

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-326530

(43)公開日 平成9年(1997)12月16日

(51)Int.Cl.⁶
H 0 1 S

識別記号 庁内整理番号

F I
H 0 1 S 3/18

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数1 O L (全14頁)

(21)出願番号 特願平9-49976

(22)出願日 平成9年(1997)3月5日

(31)優先権主張番号 614,988

(32)優先日 1996年3月12日

(33)優先権主張国 米国(US)

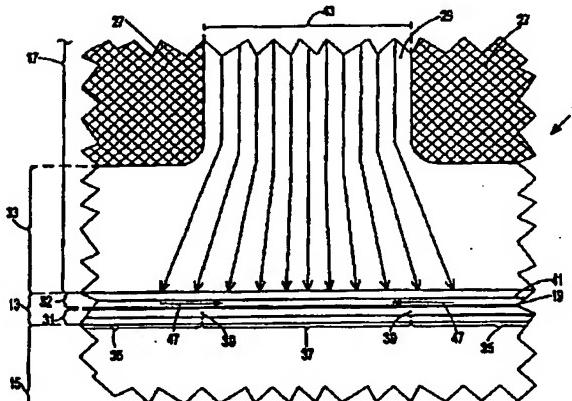
(71)出願人 590000400
ヒューレット・パッカード・カンパニー
アメリカ合衆国カリフォルニア州パロアルト
ハノーバー・ストリート3000
(72)発明者 スコット・ダブリュ・コルジン
アメリカ合衆国カリフォルニア州サンノーヴ
エイル、クレシェント アヴェニュー
628
(72)発明者 マイケル・アール・ティー・タン
アメリカ合衆国カリフォルニア州メンロ
パーク、コットンストリート315
(74)代理人 弁理士 上野 英夫

(54)【発明の名称】 垂直共振器型面発光レーザとその製法

(57)【要約】

【課題】VCSELを基礎とした光通信システムのビット伝送速度を高め、レーザプリンタのVCSELの光出力を変調できる速度を上げ、そしてVCSELの光出力を高速で変調する必要のあるその他の応用に使えるようにするために、ジック(ターンオン遅延時間の変動)を低減したVCSELを提供する。また、高い強度を有する単一光線が必要となる用途に使えるようにするために、空間ホールバーニングの発生を押さえ、高い光強度を出力できるVCSELを提供する。

【解決手段】活性層の近傍に堆積される拡散増強領域に高濃度のアクセプタ不純物をドーピングし、これにより量子井戸領域に誘発される正孔数が量子井戸領域の電子数を約1桁上回るようにする。この高濃度にドーピングされた拡散増強領域によって量子井戸領域のキャリアの拡散速度が5~25倍に高められる。これによって問題の解決が計られる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】ターンオン・ジッタを低減しつつ空間ホールバーニングを低減した垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)の製造方法において、以下の(a)ないし(c)のステップを含むことを特徴とする方法。

(a) 第一の鏡面層を形成するために第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を堆積させるステップと、

(b) 活性層を形成するために前記第一の鏡面層の上に半導体材料の層を堆積させるステップであって、前記半導体材料の層を堆積させるステップは以下(b-1)および(b-2)のステップを含む、(b-1)量子井戸領域を形成するステップと、(b-2)拡散増強領域を形成するステップであって、前記拡散増強領域によって前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約1桁上回るような高濃度に前記半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングして前記拡散増強領域を形成するステップ、

(c) 第二の鏡面層を形成するために第二伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を前記活性層上に堆積させるステップ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本願発明は、半導体レーザに関し、より詳細には、垂直共振器型面発光レーザに関する。

【0002】

【従来の技術】垂直共振器型面発光レーザ(Vertical-cavity surface-emitting laser: VCSEL)は、在来のエッジ放出レーザより優れた多くの利点、例えば、低成本製造、高歩留り、優れたビーム品質、及び計測可能な形状寸法を有する。これらの特性により、VCSELは、多くの応用分野で推奨すべきものとなっている。例えば、K.H. Hahn, M.R.T.Tan, 及びS.Y.Wangは、"Modal and Intensity Noise of Large-Area Multiple-Transverse-Mode VCS ELs", Multimode-Optical-Fiber Links, 1994 Conference on Optical Fiber Communication - paper ThB3, OFC '94において、マルチモード・ファイバデータリンクにVCSELを使用する例を説明している。しかし、VCSELのターンオン・ジッタ(ターンオン遅延時間の変動)は、該データリンクで達成し得る最大ビットレートを制限することがある。この問題は、C.R.Mirasso, P.Colet, 及びM.San Miguelが"Dependence of Timing Jitter on Bias Level for Single-mode Semiconductor Lasers under High Speed Operation", QE-29 IEEE J.Quantum Electron., pp.23-32 (1993)で、A.Sapia, P.Spano, C.R.Mirasso, P.Colet, 及びM.San Miguelが"Pattern Effects in Timing Jitter of Semiconductor Lasers", 61 Appl.Phys.Lett., pp.1748-1750 (1992)で、及びT.M.Shenが"Timing Jitter in Semiconductor Lasers under Pseudorandom Word Modulation", 7 J.Lightwave Technology, pp.1394-1399 (1989)で論じている。

【0003】VCSELのターンオン遅延は、VCSELのオフタイム、即ち、レーザ電流がスイッチオフされ再度スイッチオンされるまでの時間、により変化することは分かれている。VCSELのオフタイムは、レーザ電流を変調するデータのオンタイムの前における連続する0値の長さに応じて変化するので、VCSELのターンオン遅延はデータ依存ジッタを免れない。図1Aと1Bは、单一モードVCSELのターンオン遅延時間のビットパターン依存性を説明するものである。図1Aは、2つの両極端ビットパターンに関するターンオン過程中の光子密度の時間依存性を示す。図1Bは、2つの両極端ビットパターン及びその中間ビットパターンに関するターンオン過程中の光子密度の時間依存性を示す。図1Aと1Bにおいて、1ビットの持続時間は1 nsであり、かつレーザ電流は、VCSELのスレッシュホールド(しきい値)電流の約半分のOFF状態とスレッシュホールド電流の約5倍のON状態との間で切換えられる。図1Aにおいて、0値が長く続いた後、1値へ切換わったとき(00001)の曲線Aで描かれたターンオン遅延時間は、長い1値の後1個の0値の後、1値への切換わったとき(11101)の曲線Bで描かれたターンオン遅延時間よりかなり長い。曲線Aを曲線Bと較べれば、ターンオン遅延時間はレーザ電流のビットパターンに依存して変化することが分かる。

【0004】図1Bは、いくつかの中間ビットパターンと共に図1Aに示した両極端のビットパターンを含むいくつかの異なる疑似ランダム・ワードパターンに応答した光子密度の変化を示す。各トレースは、1値の間に様々な数の0値が入ったパターンでの遅延時間を表す。最大及び最小ターンオン遅延間の差は、ジッタの広がり(jitter spread)と呼ばれる。ジッタの広がりによって、VCSELが変調される最大レートに制限が課せられる。

【0005】ジッタの広がりの制限に加えて、VCSELはまた空間ホールバーニング(spatial hole burning)の制限を受ける。VCSELでは、光は、量子井戸領域における半導体材料の大きい断面積を通して流れるレーザ電流で生ずる。ある種の応用では、VCSELは、单一のガウス強度分布を有する光線を放出する必要がある。これは单一モード動作として知られており、单一モード動作のレーザで生じた光線は、单一光線を呼ばれる。VCSELは、レーザ電流がスレッシュホールドレベルをわずかに上回る時に单一光線を放出する。しかし、第二の、より高いスレッシュホールドレベルを越えてレーザ電流を増やすと、レーザは、二重の、又はより高い、ガウス強度分布を有する光線を放し始める。

【0006】VCSELは、量子井戸領域の中央の誘導放出ゾーンで单一光線を発生する。光が発生すると、発生光の強度に依存してキャリア密度が減損するので、单一光線の発生は、誘導放出ゾーンの中央に空乏ゾーンを形成

し、かつ空乏ゾーンを囲むゾーンにおいて対応したキャリア密度の増加を来すことになる。空間ホールバーニングは、空乏ゾーンのキャリア密度がスレッショルド以下に落ちる時に生じ、その結果、光は空乏ゾーンでもはや発生されなくなる。その時、VCSELで生じた光線は、二重のガウス強度分布を呈する。比較的高いレーザ電流では、さらに別の空乏ゾーンが誘導放出ゾーンに現れることがあり、結果として、VCSELで生じた光線は多重のガウス強度分布を有することになる。該強度分布のため、单一のガウス強度分布を持つ光線が必要とされる用途には、VCSELは適応できなくなる。

【0007】VCSELが单一光線を発生し得る最大強度に及ぼす空間ホールバーニングの制限効果のため、VCSELはある種の用途には適応できなくなる。例えば、磁気光ディスク上への書き込みに適するレーザは、約30 mWの出力を有する单一光線を発生する必要があるのに、既知VCSELで発生させ得る单一光線の最高出力は、1-2 mWの範囲である。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】従って、VCSELを基礎とした光通信システムのビット伝送速度を高めるために、及びレーザプリンタのVCSELの光出力を変調できる速度を上げるために、そしてVCSELの光出力を高速で変調する必要のあるその他の応用に使えるようにするために、ジッタの広がりを低減したVCSELが必要とされるのである。また、高い強度を有する单一光線が必要となる用途に使えるようにするために、空間ホールバーニングの開始が、既知VCSELと較べて実質的に高い光強度で生ずるVCSELが要求される。

【0009】

【課題を解決するための手段】上述した目的に応ずるため、本発明は、ターンオン・ジッタが低減されかつ空間ホールバーニングが低減された垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)の作製方法を提供するものである。該方法では、第一の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層を堆積して第一の鏡面層を形成する。その第一の鏡面層上に半導体材料の層を堆積して活性層を形成する。活性層を形成するために半導体材料の層を堆積する際、量子井戸領域を形成する。また、拡散増強領域(diffusionenhancing region)は、拡散増強領域によって量子井戸領域に誘発される正孔が量子井戸領域の電子を約1桁上回るような高濃度のアクセプタ不純物で活性層の半導体材料をドーピングして形成する。最後に、第二の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層を活性層上に堆積して第二の鏡面層を形成する。

【0010】拡散増強領域によって、量子井戸領域のキャリアの拡散速度が5~25倍に高められる。このため、キャリアは量子井戸領域内部へ急速に拡散することができるようになる。拡散増強領域は、レーザ電流がスイッチオフされると、そうでなければ量子井戸領域の誘

導放出ゾーンを囲む環状領域に蓄積したであろうキャリアを誘導放出ゾーン中へ速やかに拡散させる。これによってレーザのターンオン時間のレーザのオフ時間への依存性が軽減され、従って、ジッタの広がりが低減される。拡散増強領域はまた、誘導放出による光の発生で生ずる空乏ゾーン中へ量子井戸領域の比較的高いキャリア濃度ゾーンからキャリアを拡散させ、このため、空間ホールバーニング発生の可能性が軽減される。

【0011】拡散増強領域を形成する際、活性層の領域を量子井戸領域の外部に形成している間だけ、活性層の半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングしてよい。あるいは、量子井戸領域を囲む活性層の領域を堆積している間、活性層の半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングしてもよい。しかし、好適には、拡散増強領域は、活性層におけるデルタドープ領域(delta-doped region)である。

【0012】拡散増強領域を形成する際、量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が 10^{19} cm⁻³を越えるよう、活性層の半導体材料をシート密度(sheet density)P_{dope, sheet}のアクセプタ不純物でドーピングすることにより拡散増強領域を形成する。拡散増強領域におけるアクセプタ不純物のシート密度P_{dope, sheet}は、ほぼP' t_{QW}であり、ここでt_{QW}は、量子井戸領域における量子井戸の全厚さである。あるいは、拡散増強領域は、厚さt_{DER}をもって形成し、かつ量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が 10^{19} cm⁻³を越えるよう、アクセプタ不純物で濃度P_{dope}までドーピングしてよい。拡散増強領域におけるアクセプタ不純物の濃度P_{dope}は、式 P_{dope} = P' t_{QW}/t_{DER}により量子井戸領域における正孔の密度P'、量子井戸領域の厚さt_{QW}及び拡散増強領域の厚さt_{DER}に依存する。

【0013】本発明はまた、ターンオン・ジッタが低減されかつ空間ホールバーニングが低減された垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)も提供する。該レーザは、第一の鏡面層、量子井戸領域と拡散増強領域を含む活性層、及び第二の鏡面層から成る。第一の鏡面層は、第一の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層である。活性層は、第一の鏡面層に隣接した半導体材料の層である。第二の鏡面層は、活性層に隣接しかつ第一の鏡面層から離れており、そして拡散増強領域は、第二の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層である。拡散増強領域は、拡散増強領域によって量子井戸領域に誘発される正孔が量子井戸領域の電子を約1桁上回るような高濃度に活性層の半導体材料がそこでアクセプタ不純物でドーピングされる活性層の領域である。

【0014】拡散増強領域は、活性層における量子井戸領域の外部に配置してよい。あるいは、拡散増強領域は、活性層における量子井戸領域を包含してもよい。しかし、好適には、拡散増強領域は、活性層におけるデル

タドープ領域である。

【0015】拡散増強領域の半導体材料は、量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が 10^{19} cm^{-3} を超えるよう、シート密度 $P_{\text{dope}, \text{sheet}}$ のアクセプタ不純物でドーピングしてよい。アクセプタ不純物のシート密度 $P_{\text{dope}, \text{sheet}}$ は、ほぼ $P' t_{\text{QW}}$ であり、ここで t_{QW} は、量子井戸領域における量子井戸の全厚さである。

【0016】あるいは、拡散増強領域における半導体材料は、量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が 10^{19} cm^{-3} を超えるよう、濃度 P_{dope} のアクセプタ不純物でドーピングしてもよい。アクセプタ不純物の濃度 P_{dope} は、式 $P_{\text{dope}} = P' t_{\text{QW}} / t_{\text{DER}}$ により量子井戸領域における正孔密度P'、量子井戸領域の厚さ t_{QW} 及び拡散増強領域の厚さ t_{DER} に依存する。

【0017】

【実施例】本発明は、少ないジッタの広がりを有しかつ空間ホールバーニングの開始が既知VCSELと較べ高い光強度で起こるVCSELを提供するものである。本発明によるVCSELでは、活性層は、拡散増強領域を含むよう形成される。拡散増強領域は、アクセプタ不純物で密にドーピングされた半導体材料の層である。拡散増強領域は、量子井戸領域に隣接するか、又は量子井戸領域内部か、又は量子井戸領域を囲む活性層に配置される。拡散増強領域は、量子井戸領域において極めて高密度の正孔を含む。量子井戸領域における正孔が高密度のため、量子井戸領域におけるキャリアの両極性(ambipolar)拡散速度が著しく増大する。量子井戸領域におけるキャリアの両極性拡散速度が増大すれば、キャリアは急速に量子井戸領域に拡散でき、このため、VCSELのジッタの広がりが著しく低減され、かつ空間ホールバーニングの開始以前に発生し得る最大光強度が増強される。

【0018】本発明によるVCSELの好適な実施例11を図2Aに示す。図2Aは、活性層13の誘導放出ゾーン37、及びコアゾーン29の一部を含むVCSELの部分断面図である。活性層は、下部鏡面層15上にエピタキシー成長させる。上部鏡面層17は、活性層上にエピタキシー成長させる。図面を簡略化するため、活性層に隣接する下部鏡面層の上方部分と活性層に隣接する上部鏡面層の下方部分だけを示す。下部鏡面層と上部鏡面層とは、逆の伝導モードを持つようドーピングする。例えば、下部鏡面層は、好適には、ドナー不純物でドーピングし(n型)、上部鏡面層は、好適には、アクセプタ不純物でドーピングする(p型)。

【0019】上部鏡面層17は、陽子注入ゾーン27を含み、これがコアゾーン29を規定し取り囲む。陽子注入ゾーンは上部鏡面層を通って流れるレーザ電流をコアゾーンに限定する。レーザ電流は、上部鏡面層の上面に形成された電極から、下部鏡面層15が堆積される基板の底面上に形成された電極へ流れる。活性層近辺のVCSELの構造をより明解に示すことができるよう、電極、基板、及

び上部鏡面層の上面は図2Aには示されていない。

【0020】活性層13は、 λn の整数倍の厚さであり、ここで λn は、量子井戸領域19で生じた光の活性層材料中の波長である。活性層の好適な厚さは、 λn である。活性層は、下部鏡面層15と上部鏡面層17との間にサンドイッチ状に挟まれる。活性層は、下部クラッド領域31、上部クラッド領域32及び量子井戸領域19を包含している。クラッド領域の厚さは、量子井戸領域が下部鏡面層と上部鏡面層の中間に位置するような厚さである。量子井戸領域の構造の詳細は、図面を簡略化するため図2Aからは省かれているが、図2Cに示しかつ以下により詳細に記述する。

【0021】光は、誘導放出により量子井戸領域19の誘導放出ゾーン37で発生する。誘導放出ゾーンの横方向の範囲は、上部鏡面層17のコアゾーン29の横方向の範囲で限定されており、線39で表示してある。

【0022】本発明によるVCSELの第一の実施例11の活性層13は、拡散増強領域41を包含するよう形成する。好適な実施例では、拡散増強領域は、量子井戸領域19の外部の活性層に位置するデルタドープ領域である。拡散増強領域は、好適には、上部鏡面層17と量子井戸領域の間の上部クラッド領域32において量子井戸領域から数百オングストローム以内に配置する。

【0023】拡散増強領域41は、高濃度のアクセプタ不純物でドーピングする。拡散増強領域の実際のドーピングの程度は、量子井戸領域で誘発されるべき正孔密度と量子井戸領域及び拡散増強領域間の厚さとに依存する。活性層がIII-V族の半導体の層である時、拡散増強領域に対する好適なドーピング材料は炭素である。III-V族の半導体のうちアクセプタ不純物として作用する他の元素も用いることができる。特に、マグネシウム、ベリリウム、亜鉛のようなII族の元素は、拡散増強領域をドーピングするのに用いてよい。

【0024】前述したように、好適な実施例では、拡散増強領域41は、活性層13の上部クラッド領域32において量子井戸領域19から数百オングストローム以内にあるデルタドープ領域である。該デルタドープ領域は、量子井戸領域において所要の正孔密度を誘発するだけの十分な高さのシートドーピング密度を実現できるよう十分な量のアクセプタ不純物を上部クラッド領域の単原子層に注入することにより形成する。適切なシートドーピング密度は、 10^{13} cm^{-2} のオーダーであり、これは、それらが単原子層の約0.1%と約1%の間の原子を構成するような濃度で注入される不純物原子に相当する。所要のシート密度を定める方法を以下に詳説する。

【0025】拡散増強領域41のアクセプタは、量子井戸領域19における対応正孔を誘導する。拡散増強領域におけるアクセプタのドーピングのレベルは非常に高いので、量子井戸領域で誘発される正孔の密度は、その電子の密度より約1桁大きい。そのような高密度の正孔

は、正孔の拡散により量子井戸領域の電子の拡散を緩和する。電子と正孔の両方に関係する有効拡散レートを考慮する両極性拡散速度は、正孔拡散速度にはほぼ同等の値から電子拡散速度に近い値に増大する。電子拡散速度は、代表的半導体材料では正孔拡散速度の10倍から50倍の間である。

【0026】量子井戸領域におけるキャリアの両極性拡散速度を高めることは、2つの有益な効果を生む。まず、ジッタの広がりが低減する。高い両極性拡散速度によって誘導放出ゾーン37を囲む活性層のゾーンに蓄積するキャリアの影響力が低減される。そうでなければ該ゾーンに蓄積したであろうキャリアは、横方向に誘導放出ゾーン中に拡散することができる。次に、空間ホールバーニングの開始以前に発生し得る単一光線の強度は強くなる、何故なら高い両極性拡散速度によってキャリアが横方向に拡散して誘導放出ゾーン37の中央の空乏ゾーンにおけるキャリア供給量を補充できるからである。このため、空乏ゾーンのキャリア密度がスレッショルドレベル以下に下降することはなく、誘導放出ゾーン全域で光の発生が維持されるのである。

【0027】これより本発明によるVCSELの好適な実施例をさらに詳細に説明する。下部鏡面層15と上部鏡面層17は、それぞれ、好適には、多対の鏡面要素から成る分散型ブリッジ反射器である。例えば、下部鏡面層は32.5対の鏡面要素から構成されることがあり、上部鏡面層は20対の鏡面要素から構成されることもある。図面を簡単にするため、活性層13にすぐ隣接する下部鏡面層における鏡面要素対21だけを示す。鏡面要素の各対は、高屈折率の鏡面要素と低屈折率の鏡面要素とから成る。鏡面要素対21は、例えば、鏡面要素23と25から成る。鏡面要素の各対では、2つの鏡面要素は、異なる屈折率を有する異なる半導体材料の層である。例えば、高屈折率の鏡面要素はAlGaAsの層であってよいし、低屈折率の鏡面要素はAlAsの層であってよい。あるいは、AlAsとGaAsの層、又は当分野で周知の他の適当な材料の対から成る層を用いることもできる。鏡面要素は、好適には、当分野で知られているように、隣接鏡面要素間の界面前後の電気抵抗とバンドオフセットを低減できるよう構成する。例えば、グレーデッド(傾斜)遷移(graded transition)が隣接した鏡面要素の材料間で行われたり、又はグレーデッド短周期超格子(graded short period super lattice)が隣接鏡面要素間で形成されることもある。各鏡面要素は、 $\lambda n/4$ という厚さを有し、ここで λn は、量子井戸領域19で生じた光に関する鏡面要素の半導体材料中の波長である。

【0028】陽子注入ゾーン27は、活性層13から離れた上部鏡面層の表面(非表示)から上部鏡面層17中へ延びるが、上部鏡面層中を活性層の所までは延びない。陽子注入ゾーンの導電率は、それが取り囲んでいるコアゾーン29のそれより小さい。この導電率の差によって上部鏡

面層中を流れるレーザ電流をコアゾーンに限定するのである。陽子注入ゾーンの最深部と活性層間の領域33では、レーザ電流は、陽子注入ゾーンによって規定された閉じ込め状態から横方向に広がる。故に、活性層の量子井戸領域19中へ流れるレーザ電流は、量子井戸領域の誘導放出ゾーン37に、即ち、上部鏡面層のコアゾーンの下にある量子井戸領域の部分に、限定されない。

【0029】活性層13は、量子井戸領域19で生じた光を透過する半導体材料の層である。例えば、活性層は、AlGaAsの層であってよい。拡散増強領域41の外側では、活性層は、ドーピングしないか、もしくは等しい濃度のドナー及びアクセプタ不純物でドーピングする。あるいは、活性層の下部クラッド層31は、下部鏡面層15におけるドナー不純物とほぼ同じ濃度のドナー不純物でドーピングしてもよく、かつ上部クラッド層32は、上部鏡面層17におけるアクセプタ不純物とほぼ同じ濃度のアクセプタ不純物でドーピングしてもよい。

【0030】量子井戸領域19は、好適には、3ないし5層の量子井戸から成る。図2Cは、3層の量子井戸を有する量子井戸領域の一例を示す。量子井戸51は下部クラッド領域31に隣接して配置され、障壁層55によって量子井戸53から分離されている。量子井戸57は上部クラッド領域32に隣接して配置され、障壁層59によって量子井戸53から分離されている。各量子井戸は、好適には、ガリウム砒素(GaAs)の層であり、各障壁層は、好適には、AlGaAsの層である。各量子井戸は、好適には、約80Åの厚さである。

【0031】本発明によるVCSELの好適な実施例11は、分子線エピタキシー法(MBE)又は有機金属気相成長法(MOCVD)のような技術によって、適当な基板(非表示)上に下部鏡面層15を成長させることにより作られる。半導体材料の薄い層を順番に成長させるこれらの技術は、当分野で周知である。下部鏡面層15を成長させている間に、ドナー(n型)不純物を、交互に堆積される半導体材料に一連の流れの中で注入し下部鏡面層を形成する。このように、下部鏡面層は、n型にドーピングされる。

【0032】次いで、例えば、AlGaAsの層をMBE又はMOCVDにより下部鏡面層上に堆積させて下部鏡面層に隣接する活性層13の下部クラッド領域31を形成する。下部クラッド領域を形成するには堆積材料に不純物を注入しない。あるいは、等濃度のドナー及びアクセプタ不純物を堆積材料に注入して下部クラッド領域を形成してもよい。さらに別法として、下部クラッド領域は、下部鏡面層におけるそれと同様の濃度のn型不純物を用い、下部クラッド領域の厚さが増すにつれその濃度を減らすようにして、ドーピングしてもよい。

【0033】下部クラッド領域31がその所要の厚さに到達し終わった後、半導体材料の多層薄膜層を下部クラッド領域上に堆積させて量子井戸領域19を形成する。量子井戸領域が形成され終わった後、さらに半導体材料を量

子井戸領域上に堆積させて上部クラッド領域32を形成する。上部クラッド領域を形成するには堆積材料に不純物を注入しない。あるいは、等濃度のドナー及びアクセプタ不純物を堆積材料に注入して上部クラッド領域を形成してもよい。さらに別法として、上部クラッド領域は、上部鏡面層17で用いられるそれと同様の濃度まで漸次増加する濃度のp型不純物を用いてドーピングしてもよい。

【0034】拡散増強領域41は、上部クラッド層の厚さが数百オングストローム未満の時に上部クラッド領域32を形成するべく堆積される半導体材料の一連のプロセスの流れを中断することにより、そして部分的に形成された上部クラッド領域の表面上にアクセプタ不純物原子を堆積させることにより、形成する。炭素原子は、四臭化炭素 CBr₄を気化し、その蒸気を部分的に形成された上部クラッド領域と接触させることにより、アクセプタ不純物として堆積される。部分的に形成された上部クラッド領域と接触すると、四臭化炭素が分離し、その結果生ずる炭素原子が、アクセプタ不純物として、部分的に形成された上部クラッド領域の半導体材料の格子上に堆積される。拡散増強領域を構成するアクセプタ不純物原子が部分的に形成された上部クラッド領域上に堆積され終わつた後、上部クラッド領域を形成する半導体材料の堆積操作が再開される。

【0035】活性層13が入るという所要全厚を有するような厚さに上部クラッド領域32が到達すると、上部鏡面層17を形成するべく材料を堆積させる工程が開始される。上部鏡面層を形成するべく材料を堆積している間に、上部鏡面層を形成するべく交互に堆積される半導体材料のプロセスの一連の流れの中でアクセプタ不純物を注入する。これによって上部鏡面層の半導体材料がp型にドーピングされる。上部鏡面層を形成するべく堆積される半導体材料に注入されるアクセプタ不純物の濃度は、実質的には、拡散増強領域41におけるそれより低い。

【0036】図2Bは、本発明によるVCSELの好適な実施例11についての図2Aの線2B-2Bに沿うドーピング分布を示す。図2Bのy-軸のスケールは、図2Aの垂直スケールに一致する。図2Bは、下部鏡面層15が中程度乃至高濃度のドナー不純物でドーピングされていることを示す。下部鏡面層と活性層13間の境界では、アクセプタ不純物の濃度は急激に減少してドナー不純物の濃度とほぼ同等である。ドナー不純物の濃度は、拡散増強領域41における以外、活性層全域でアクセプタ不純物の濃度と実質的に同等に保持される。拡散増強領域41では、アクセプタ不純物の濃度は、下部鏡面層におけるドナー不純物の及び上部鏡面層17におけるアクセプタ不純物の濃度より約10倍高い値まで急激に増加する。活性層と上部鏡面層間の境界では、アクセプタ不純物の濃度は、下部鏡面層におけるドナー不純物のそれとほぼ同等の値まで急激に増加す

る。アクセプタ不純物の濃度は、上部鏡面層全域でこのレベルに保持される。

【0037】上述のように、拡散増強領域41は、活性層13のどこに位置するデルタドープ領域であってよい。しかし、拡散増強領域は、量子井戸領域19から100オングストローム以内の活性層にある時が最も効果的である。図2Aに示した好適な実施例では、拡散増強領域は、量子井戸領域19から数百オングストローム以内の活性層13の上部クラッド領域32に位置するデルタドープ領域である。

【0038】図2C-2Fは、拡散増強領域41の代替配置と構成を示す。拡散増強領域は、量子井戸領域19の障壁層の1つに配置されたデルタドープ領域であってよい。図2Cは、量子井戸領域19を含む活性層13の部分を示す。量子井戸領域では、量子井戸51は下部クラッド領域31に隣接して配置され、障壁層55によって量子井戸53から分離されている。量子井戸57は上部クラッド領域32に隣接して配置され、障壁層59によって量子井戸53から切り離されている。図2Cに示した代替例では、拡散増強領域41は、量子井戸19の中で、量子井戸層51、53、及び59の外側に位置するデルタドープ領域である。拡散増強領域は、障壁層59に位置するように示されているが、その代わりに、障壁層55に配置されてもよい。

【0039】好適な実施例では、拡散増強領域41は、量子井戸領域と上部鏡面層17の間の活性層13に位置するデルタドープ領域である。しかし、図2Dに示すように、拡散増強領域は、量子井戸領域と下部鏡面層との間の活性層13の下部クラッド層31に位置するデルタドープ領域であってよい。再度記述するが、拡散増強領域は、量子井戸領域から数百オングストローム以内にある時が最も効果的である。

【0040】上述のデルタドープ領域より厚い層を拡散増強領域41として代わりに用いることもできる。図2Eは、上部クラッド領域32、活性領域19及び下部クラッド領域31の一部分がアクセプタ不純物で密にドーピングされて拡散増強領域を形成する場合の活性層13の一部を示す。拡散増強領域は、上部クラッド領域の全体を通り下部クラッド領域の途中まで延び、量子井戸領域を囲むように示されている。あるいは、拡散増強領域は、下部クラッド領域中の途中から上部クラッド領域中の途中まで延びて、量子井戸領域を包含するようにしてもよい。以下にさらに詳細に記述するように、図2Eに示すバルクドープ拡散増強領域のアクセプタ不純物のシート密度は、実質的には、図2A-2Cに示すデルタドープ拡散増強領域におけるそれより低い。

【0041】図2Fは、上部クラッド領域32の部分だけをアクセプタ不純物で密にドーピングして拡散増強領域41を形成する場合の変形を示す。上部クラッド領域が数百オングストローム未満の厚さである時には、そこから高濃度のアクセプタ不純物を堆積材料に添加して上部クラ

ド領域を形成する。拡散増強領域は、図示したように、上部鏡面層17の所まで延びるか、又は上部鏡面層への途中まで延びてよい。以下に詳細に述べるように、図2Fにおける拡散増強領域の厚さを図2Eの拡散増強領域のそれに較べて薄くするには、量子井戸領域19に同一の正孔密度を誘発できるよう前者の不純物密度が後者のそれより大きい必要がある。

【0042】次ぎに、ターンオン・ジッタと空間ホールバーニングの発生メカニズムを示す。在来型VCSELの動作についての発明者の解析を図3Aを参照して説明する。図3Aは、図2Aに示した本発明によるVCSELの好適な実施例と類似した在来型VCSELの部分200を示す。図3Aに示した在来型VCSELは、その活性層に拡散増強領域を欠失していることを除けば、図2Aに示した実施例と同様の構造を有している。好適な実施例の構成要素に対応する図3Aに示したVCSELのそれらは、図2Aにおけるのと同じ参考番号を使って表示し、ここでは詳細に説明しない。図2Aに示した代表的な鏡面要素の対は、図面を簡略化するために図3Aからは省く。

【0043】矢印43で示したレーザ電流は、上部鏡面層17の上側表面上に形成された電極から下部鏡面層15が堆積される基板の底面表面上に形成された電極の方へ流れれる。それらの電極、基板、及び上部鏡面層の上面は、図面を簡略化するため図3Aには示さない。上部鏡面層のコアゾーン29とそれを取り囲む陽子注入ゾーン27との間に導電率の差があるため、上部鏡面層中のレーザ電流の流れは、横方向にはコアゾーンに限定される。

【0044】陽子注入ゾーン27も、上部鏡面層17におけるより精度は落ちるが、活性層213の量子井戸領域219中のレーザ電流の流れ43の横方向の広がりを限定する。陽子注入で生ずる結晶構造の崩壊のため、陽子注入領域は、活性層の所まで拡張しないように上部鏡面層に配置される。キャリアは、陽子注入ゾーンによって規定された限定範囲を越えて陽子注入ゾーンの最深部と活性層間の領域33で横方向に広がる。

【0045】活性層の量子井戸領域219に入るキャリアは、誘導放出で光を発生する。しかし、誘導放出による光の発生は、上部鏡面領域17のコアゾーン29の下にある量子井戸領域219の一部分である、誘導放出ゾーン37においてのみ生ずる。レーザ電流の横方向の広がりとは、誘導放出ゾーンを取り囲みかつ上部鏡面領域の陽子注入ゾーン27の下にある蓄積ゾーン(reservoir zone)にキャリアのいくつかが入ることを指す。蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘導放出によって光を発生しない、何故なら陽子注入ゾーンの反射率が低いため誘導放出が起こるほど十分な光学利得が得られないからである。蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘導放出によって光を発生することで消滅することはない。さらに、在来型VCSEL 200は、活性層213に拡散増強領域を欠いている故、量子井戸領域におけるキャリアの拡散速度は比較的低く、かつ蓄積

ゾーンに入るキャリアは、誘導放出ゾーン中へ徐々に拡散するに過ぎない。結果として、レーザ電流が流れると、キャリアが蓄積ゾーンに蓄積することになる。蓄積ゾーンに蓄積するキャリアの密度は、図3Bに示すように、限界密度を越えるおそれもある。

【0046】蓄積ゾーン35に蓄積するキャリアの在来型VCSEL 200のターンオン遅延に及ぼす影響についての発明者の解析を次に述べる。単一モード陽子注入VCSELのターンオン過程は、最も標準的なキャリアと陽子のレート方程式に類似した一組の单一モードレート方程式を使って想定してよい。L.A.ColdrenとS.W.Corzineは、DIODE LASERS AND PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS, Wiley Interscience, New York (1995)の第5章に前述の方程式を記述している。しかし、発明者は、誘導放出ゾーン37を囲む蓄積ゾーン35におけるキャリアの効果を考慮に入れるべく2つのキャリア成分を含むようにその方程式を修正した。第一の成分は、キャリアの密度が限界密度に近づくと誘導放出によって光を発生する誘導放出ゾーンのキャリアを表す。第一成分は、標準のレート方程式で記述される。第二成分は、誘導放出ゾーンを囲む蓄積ゾーンにあるキャリアを表す。上述のように、キャリアは、陽子注入領域27によるレーザ電流43の横方向の限定の不完全さに起因するレーザ電流の横方向への拡張により、蓄積ゾーンに入る。蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘導光子放出に荷担できず、かつ、それらの低拡散速度のため、蓄積ゾーンから外へ徐々に拡散するだけである。それ故、それらは蓄積ゾーンに蓄積することになる。そのレート方程式を次に示す。

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= (1-\alpha) \eta I / q V_1 - (R_{sp1} + \\ R_{nr1}) - v_g g N_p - (N_1 - N_2) / \tau_d \\ dN_p/dt &= (\Gamma v_g g - 1 / \tau_p) N_p + \Gamma R_{sp} \\ dN_2/dt &= \alpha \eta I / q V_2 - (R_{sp2} + R_{nr2}) + V_1 (N_1 - N_2) / V_2 \tau_d \end{aligned}$$

ここで、 N_1 と N_2 は、それぞれ、誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンにおけるキャリア密度、 V_1 と V_2 は、それぞれ、誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンの容積、 I は、レーザ電流、 α は、蓄積ゾーンに入るレーザ電流 I の割合であり、 α は、次式によって V_1 と V_2 と関係付けられる、

$$V_2 = \alpha V_1 / (1 - \alpha)$$

N_p は、平均光子密度、 τ_p は、光子の寿命、 g は、材料利得、 V_g は、群速度、 Γ は、定在波強調(standing wave enhancement)を含む三次元限定因子、 η は、(誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンの両方で等しいと仮定した)垂直注入効率、 R_{sp} は、自然放出レート、 R_{nr} は、Auger再結合を含む非発光再結合であり、かつレーザ放射モードへの自然放出レート、 τ_d は、拡散時間である。

【0047】誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンの間の結合項は、拡散時間、 τ_d を含む。この項は、1つのゾーンから他へのキャリアの拡散速度を特性付けるものである。拡散時間は、

$$\tau_d = L^2 / 2D_{np}$$

で表してよく、ここで、 D_{np} は、電子と正孔の両方の拡散を表す両極性拡散定数であり、 L は、2ゾーン間の特性拡散長である。

【0048】拡散時間の正確な計算には、キャリア及び光子密度の両方の空間依存性を含まなければならないであろう。しかし、この解析では、上に説明したように計算した拡散時間は、蓄積ゾーンと誘導放出ゾーンの間のキャリアの拡散効果を予測するのに十分使えるだけの精度がある。典型的拡散長として $5\mu m$ を、典型的両極性拡散定数として $10\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ を選ぶことにより、典型的拡散時間 τ_d として 10ns のオーダーが与えられる。

【0049】図4は、上述の発明者のモデルから得たもので、ジッタの広がりに及ぼすキャリアの拡散時間定数の効果を示す。ジッタの広がりは、図1AのカーブA及びBの条件下で得られた最大及び最小ターンオン時間の間の変動分である。ジッタの広がりは、レーザ電流からのキャリアが誘導放出ゾーン37の外部の蓄積ゾーン35に蓄積するために生ずる。蓄積ゾーンにおけるキャリアの累積は、レーザ電流がスイッチオフされた後の、誘導放出ゾーン中へ拡散するキャリアの一時的供給源として作用する。誘導放出ゾーン中へ拡散するキャリアによって、誘導放出ゾーン中のキャリア密度がゼロまで急激に降下するのが防止される。それどころか、拡散キャリアは、レーザ電流がスイッチオフされた後短時間の間、誘導放出ゾーンのキャリア密度を維持するのである。結果として、レーザ電流が短時間スイッチオフされると、図1AのカーブBにおけるように、誘導放出ゾーンにおけるキャリア密度は、キャリアの拡散が無かった場合に得られる値より高くなる。これは、キャリア密度を限界水準まで回復させるのに比較的少ないキャリアがレーザ電流によって誘導放出ゾーンに注入されればよいので、通常より短いターンオン時間になる。

【0050】他方、レーザ電流が、図1Aにおけるように連続する長い0値が1に先行する時のような、比較的長い時間スイッチオフされると、キャリアが蓄積ゾーンから誘導放出ゾーンへ拡散し、その後誘導放出ゾーンにおけるキャリアの密度が低い値になるのに十分な時間が経過する。レーザ電流が再度スイッチオンされる時、キャリア密度をこの低水準から限界水準まで持ち上げるために十分なキャリアがレーザ電流によって誘導放出ゾーンに注入されなければならない。これには、誘導放出ゾーンのキャリア密度が蓄積ゾーンから拡散するキャリアによって維持される時より長い時間を要する。このように、ターンオン遅延は、レーザ電流のオフ時間により変化する。最大のターンオン時間は、ターンオンの前に長いオフ時間、即ち、5ビットの時間に対応するオフ時間がある時に得られる。最小のターンオン時間は、ターンオンの前に短いオフ時間、即ち、1ビットの時間に対応するオフ時間がある時に得られる。

【0051】図4において、各カーブは、蓄積ゾーンと誘導放出ゾーン間の拡散時間 τ_d に応じてジッタの広がりがどのように変化するかを示すものである。3つのカーブを示す。各カーブは蓄積ゾーンに入るレーザ電流の様々な割合についてプロットされている。図4はレーザ電流の大部分が蓄積ゾーンに入る時にジッタの広がりが増大すること、及びビットレートに関して一定の範囲にある拡散時間ではジッタの広がりが2倍以上に大きくなることを示している。

【0052】図4はまた、拡散時間 τ_d が非常に小さいか又は非常に大きい時に、ジッタの広がりは、キャリアの溜めからのキャリアの拡散が無い場合に対応する値まで減少する、ということも示している。拡散時間が非常に小さい時、キャリアは、蓄積ゾーンから誘導放出ゾーンへ速やかに拡散し、そして2つのゾーンにおけるキャリア密度が速やかに平衡状態に達する。このように、拡散時間を極めて小さい値まで減らせば、蓄積ゾーンに蓄積するキャリアで引き起こされるジッタの広がりが実質的に低減される。他方、極めて大きい拡散時間では、キャリアは2つのゾーン間で非常に緩慢に拡散するようになり、その結果、蓄積ゾーンは、レーザ電流がターンオフされた後、誘導放出ゾーンのキャリア密度を十分維持できるほど速やかに誘導放出ゾーンへキャリアを供給できなくなる。それ故、拡散時間 τ_d が非常に小さいか又は非常に大きいかの何れかである時は、蓄積ゾーンからのキャリアの拡散は、顕著なジッタの広がりの原因にはならない。拡散時間がキャリアの寿命には近い時に最大のジッタの広がりが生ずる。

【0053】上述のように、蓄積ゾーンと誘導放出ゾーン間の拡散時間 τ_d は、次式

$$\tau_d = L^2 / 2D_{np}$$

によって、両極性拡散定数 D_{np} 及び蓄積ゾーンと誘導放出ゾーン間の特性拡散長 L に関連する。両極性拡散定数 D_{np} は、次式、

$$D_{np} = (N + P) / (N/D_p + P/D_n)$$

によって、電子密度 N 、電子拡散定数 D_n 、正孔密度 P 及び正孔拡散定数 D_p に関連する。

【0054】図3Aに示す在来型のVCSELは、拡散増強領域を欠いている。従って、量子井戸領域219における電子密度は正孔密度に等しい、即ち、 $P = N$ 、それ故、両極性拡散定数は、

$$D_{np} = 2D_n D_p / (D_n + D_p)$$

となる。電子拡散定数 D_n と正孔拡散定数 D_p は、それぞれ、電子移動度 μ_n と正孔移動度 μ_p に比例すると、即ち $D_n / D_p = \mu_n / \mu_p$

と仮定することができる。典型的量子井戸領域の材料に関して、電子移動度 μ_n は、正孔移動度 μ_p の10-50倍の範囲にある。結果として、

$$D_n > D_p$$

及び $D_{np} \approx 2D_p$ （在来型VCSELの場合）となる。このよう

に、在来型VCSEL量子井戸領域219においては、両極性拡散定数は、正孔拡散定数のそれの約2倍であり、かつ電子拡散定数の1/5~1/25の範囲にある。

【0055】これより、図5Aと5Bを参照し、本発明によるVCSELの好適な実施例11を例として使って、本発明によるVCSELにおいてジッタの広がりと空間ホールバーニングを低減する際の拡散増強領域の作用を説明する。図5Aは、本発明によるVCSELの好適な実施例を例証例として示すものである。本発明によるVCSEL 11では、拡散増強領域は、拡散時間 τ_d を縮めることによってジッタの広がりを減じかつ空間ホールバーニングを抑えている。

【0056】VCSEL 11の上部鏡面層17中のレーザ電流の流れを矢印43で表す。レーザ電流の流れは、図3Aに示した在来型VCSELにおけるそれと類似している。上部鏡面層のコアゾーン29とそれを取り囲む陽子注入ゾーン27との間に導電率の差があるため、上部鏡面層中のレーザ電流の流れは、横方向にコアゾーンまでに限定される。陽子注入ゾーン27も、上部鏡面層17におけるより精度は落ちるが、活性層13の量子井戸領域19中のレーザ電流の流れ43の横方向の広がりを限定する。従って、ある割合のレーザ電流が、誘導放出ゾーン37を取り囲む蓄積ゾーン35の量子井戸領域に入る。蓄積ゾーンに入るキャリアは、光発生に荷担することによって減らされることはない。

【0057】本発明によるVCSELは、活性層13に拡散増強領域41を包含する。拡散増強領域は、アクセプタ不純物で密にドーピングされる。拡散増強領域における高濃度のアクセプタ不純物は、量子井戸領域に高密度の正孔を誘発する。結果として、量子井戸領域における正孔の密度は、電子の密度よりもはるかに大きくなる、即ち、P >> N。正孔の密度が電子の密度よりもはるかに大きくなると、量子井戸領域の両極性拡散定数は、

$$D_{np} \approx D_n$$

となる。このように、本発明によるVCSELでは、電子密度に比して量子井戸領域における正孔の密度がはるかに大きいので、量子井戸領域の両極性拡散定数 D_{np} が電子拡散定数 D_n とほぼ同じ値になる。換言すれば、拡散増強領域は、在来型のVCSELに較べ拡散時間 τ_d を5~25倍短縮する。そのジッタの広がりが最大値に近いVCSELでは、拡散時間が5~25倍短縮されると、ジッタの広がりが顕著に低減されるに至る、ということを図4は示している。このため、次には、レーザ電流が変調される周波数を高くでき、又は変調周波数を変更しない場合には比較的単純な検出回路の使用が可能となる。

【0058】拡散増強領域41による拡散時間 τ_d の短縮により、キャリアは、量子井戸領域19の蓄積ゾーン35から誘導放出ゾーン37まで在来型のVCSELにおけるより速く拡散できるようになる。キャリアは、図5Aの矢印47で示されたように、蓄積ゾーンから誘導放出ゾーン中に拡散できるので、蓄積ゾーンに溜まっているキャリアの密

度は減少する。その結果得られるキャリア密度の分布を図5Bに示す。

【0059】拡散時間の短縮は、レーザ電流がスイッチオンされている間の蓄積ゾーン35に溜まっているキャリアの最大密度を下げるのみならず、レーザ電流がスイッチオフされる時に蓄積ゾーンに残存しているキャリアが誘導放出ゾーン37中に拡散しそして誘導放出に加わるのに要する時間を短縮する。従って、誘導放出ゾーンにおけるキャリアの密度は、レーザ電流がスイッチオフされた後、在来型のVCSELにおけるより速く低い値に下降する。それ故、レーザ電流が再度スイッチオンされると、レーザ電流はキャリア密度をこの低値から常に引き上げなければならない。ターンオン時間のオフ時間への依存性は、それ故、軽減されるのである。

【0060】ジッタの広がりを低下させるのに加えて、本発明によるVCSELの拡散増強領域41によって量子井戸領域19においてもたらされたキャリアの拡散速度の増大は、VCSELが発生する単一光線の最大強度も高める。上述のように、低いレーザ電流では、誘導放出は、誘導放出ゾーン37全域で起こり、その最高強度はゾーン中央部で生ずる。誘導放出は、誘導放出ゾーンのキャリア密度を光の強度に比例して低下させる。結果として、キャリア密度の欠失は、誘導放出ゾーンの中央部で最大となる。在来型VCSELの誘導放出ゾーンの中央部におけるキャリア密度の欠失は、図3Bの破線61で表す。レーザ電流が増加するにつれて、誘導放出ゾーンの中央部におけるキャリア密度が、発光をしない臨界であるスレッショルド値以下に十分に低下する時に、空間ホールバーニングが起こる。

【0061】本発明によるVCSEL 11の活性層13の拡散増強領域41によって、キャリアが活性層で横方向に拡散する速度が高められる。拡散増強領域が上述の蓄積ゾーン35と誘導放出ゾーン37間のキャリアの拡散をスピードアップする場合と同じように、拡散増強領域により量子井戸領域に誘発されるキャリア拡散の高速化によって、キャリアは、光発生でキャリア密度が減じる時、誘導放出ゾーン中央部に拡散することが可能となる。このため、誘導放出ゾーン中央部におけるキャリア密度は、光発生が起こらない臨界密度より下に落ちることはない。従って、誘導放出による光発生によって、誘導放出ゾーン中央部のキャリア密度が減じると、キャリアは速やかに空乏ゾーン内部に拡散でき、ここでそれらは誘導放出による単一光線発生に荷担する。広面積の活性層からのキャリアが単一光線発生に荷担するので、その結果として、本発明によるVCSELの最大単一モード光出力は、拡散増強領域を欠いている在来型VCSELにおけるより大きくなるのである。

【0062】さらに、発明者が本発明のVCSELから予測していることは、大面積のVCSELでは、誘導放出ゾーン37においてより均一なキャリア分布を得ることに対する

拡散増強領域41の効果がより均一なモード分布を生ずるであろうということ、及び該モードは、レーザ電流を増加するにつれてそれほど突発的には変化しないであろうということである。モードのより均一な分布は、在来型VCSELの強度／レーザ電流特性におけるより途切れの少ない、より平滑な光強度／レーザ電流特性を生ずる。

【0063】また、発明者は本発明のVCSELから、拡散増強領域41は量子井戸領域19の微分利得を著しく増加させるであろう、ということも予測している。微分利得は、キャリア密度に関する利得の変分である。高い微分利得は、在来型VCSELに較べ本発明によるVCSELの緩和共振周波数を高めて、本発明によるVCSELをより高い変調速度で作動できるようにする。

【0064】最後に、本発明によるVCSELの拡散増強領域41におけるドーピングレベルを決定するプロセスを記述する。在来型VCSELの量子井戸領域における電子密度と正孔密度は、各々、臨界レーザ電流値において約 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。それ故、電子密度と正孔密度の積PNは、約 $1.6 \times 10^{37} \text{ cm}^{-6}$ となる。本発明によるVCSELでは、拡散増強領域41は、量子井戸領域19において誘発される正孔密度P'が電子密度N'より約1桁（約10倍）大きくなるように、アクセプタ不純物で密にドーピングしなければならない。この不均衡は、両極性拡散定数の有効増をもたらすためには拡散増強領域にとって必要とされるものである。また、本発明によるVCSELが在来型VCSELとほぼ同じ利得を有するためには、拡散増強領域は、量子井戸領域の電子密度と正孔密度の積R'N'が在来型VCSELのPNの値とほぼ同等となるようにドーピングされなければならない。これらの要件は、例えば、量子井戸領域における正孔密度P'を電子密度N'の約10倍、即ち、

$$P' = 10N'$$

にすることによって、満足し得る。また、

$$P'N' = 1.6 \times 10^{37}$$

N'に代入して

$$P' = 1.26 \times 10^{19}$$

を得る。故に、量子井戸領域における対応電子密度N'は、

$$N' = (1.6 \times 10^{37}) / (1.26 \times 10^{19})$$

$$= 1.26 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

となる。

【0065】量子井戸領域19における正孔密度P'と電子密度N'に対するこの値の選択で、正孔密度P'が電子密度N'の10倍に設定される。キャリア密度におけるこの不均衡の次数は、両極性拡散定数D_npを電子拡散定数D_nに実質的に等しい値まで大きくするのには十分であり、その結果、特性拡散時間τ_dは、電子拡散定数と正孔拡散定数の比の半分の率まで、即ち、5～25倍の範囲で、縮められることになる。この範囲の大きさまで拡散時間を減じれば、ジッタの広がりの実質的低減がもたらされることとは、図4から分かることである。

【0066】拡散増強領域41は、量子井戸領域19において、拡散増強領域41の正孔のシート密度P_{dope, sheet}に実質的に等しい正孔のシート密度P_{QW, sheet}を誘発する。従って、拡散増強領域は、量子井戸領域において誘発される正孔のシート密度が正孔の所望バルク密度P'に対応するようなシート密度にアクセプタ不純物でドーピングされなければならない。量子井戸領域におけるシート密度P_{QW, sheet}は、量子井戸領域における正孔の所望バルク密度P'と、量子井戸領域における量子井戸の全厚t_{QW}との積に等しい、即ち、

$$P_{QW, sheet} = P' t_{QW}$$

【0067】上述のように、P'の値を 1.26×10^{18} に設定し、全厚t_{QW}が250Åの量子井戸領域において3つの80Å厚の量子井戸を用いる場合、量子井戸領域において誘発されなければならないシート密度P_{QW, sheet}は、約、
 $P_{QW, sheet} = 1.26 \times 10^{18} \times 2.4 \times 10^{-6}$
 $\approx 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$

となる。

【0068】デルタドープ領域は、それらのシートドーピング密度で特色付けられる。それ故、図2Aと2Cに示したような、デルタドープ拡散増強領域41を有する実施例では、拡散増強領域は、そのシートドーピング密度P_{dope, sheet}が量子井戸領域におけるシート密度P_{QW, sheet}に等しくなるように、即ち、

$$P_{dope, sheet} = P_{QW, sheet} \approx 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$$

になるようにドーピングする。

【0069】図2Dと2Eに示したような、バルクドープ拡散増強領域41を有する実施例では、拡散増強領域はやはり、そのシートドーピング密度P_{dope, sheet}が量子井戸領域におけるシート密度P_{QW, sheet}に等しくなるよう、即ち、約 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ までドーピングする。

【0070】拡散増強領域のシートドーピング密度P_{dope, sheet}は、拡散増強領域における所要バルクドーピング密度P_{dope}と、拡散増強領域の厚さt_{DER}との積に等しい。それ故、拡散増強領域の所要バルクドーピング密度P_{dope}は、

$$P_{dope} = P' t_{QW} / t_{DER}$$

又は

$$P_{dope} = P_{dope, sheet} / t_{DER} \approx 3 \times 10^{13} / t_{DER}$$

で与えられる。

【0071】このように、量子井戸領域において与えられた正孔密度を誘発するために拡散増強領域において必要とされるバルクドーピング密度は、拡散増強領域の厚さに反比例する。

【0072】以上、本発明の実施例について詳述したが、以下、本発明の各実施態様の例を示す。

【0073】(実施態様1) ターンオン・ジッタを低減しつつ空間ホールバーニングを低減した垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)の製造方法において、以下の(a)ないし(c)のステップを含むことを特徴とする方法、

(a) 第一の鏡面層を形成するために第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を堆積させるステップと、

(b) 活性層を形成するために前記第一の鏡面層の上に半導体材料の層を堆積させるステップであって、前記半導体材料の層を堆積させるステップは以下(b-1)および(b-2)のステップを含む、(b-1)量子井戸領域を形成するステップと、(b-2)拡散増強領域を形成するステップであって、前記拡散増強領域によって前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約1桁上回るような高濃度に前記半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングして前記拡散増強領域を形成するステップ、

(c) 第二の鏡面層を形成するために第二伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を前記活性層上に堆積させるステップ。

【0074】(実施態様2) 実施態様1記載の製造方法であって、前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記量子井戸領域の外側部に前記活性層の領域を堆積させている間だけ前記アクセプタ不純物を使って前記半導体材料をドーピングすることを特徴とする製造方法。

【0075】(実施態様3) 実施態様1記載の製造方法であって、前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記量子井戸領域を包含する前記活性層の領域を堆積させている間に前記アクセプタ不純物を使って前記半導体材料をドーピングすることを特徴とする製造方法。

【0076】(実施態様4) 実施態様1記載の製造方法であって、前記拡散増強領域がデルタドープ領域であることを特徴とする製造方法。

【0077】(実施態様5) 実施態様1ないし4に記載の製法であって、前記活性層として堆積される前記半導体材料がIII-V族の半導体材料であり、かつ前記アクセプタ不純物がII族の元素とIV族の元素から成る組から選択されることを特徴とする製造方法。

【0078】(実施態様6) 実施態様1記載の製造方法であって、以下の(a)および(b)を含むことを特徴とする方法、(a)前記量子井戸領域を形成するステップにおいて、全厚 t_{QW} を有する量子井戸が形成され、

(b) 前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記拡散増強領域は、前記量子井戸領域における前記拡散増強領域で誘発される正孔の密度 P' が 10^{19} cm^{-3} を越えるようなシート密度 $P_{dope, sheet}$ の前記アクセプタ不純物で前記活性層の半導体材料をドーピングすることにより形成され、前記拡散増強領域における前記アクセプタ不純物の該シート密度 $P_{dope, sheet}$ がほぼ $P' t_{QW}$ である。

【0079】(実施態様7) 実施態様1記載の製造方法であって、以下の(a)および(b)を含むことを特徴とする方法、(a)前記量子井戸領域を形成するステッ

プにおいて、全厚 t_{QW} を有する量子井戸が形成され、

(b) 前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記拡散増強領域が厚さ t_{DER} に形成され、かつ前記活性層の半導体材料は前記量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度 P' が 10^{19} cm^{-3} を越えるような濃度 P_{dope} の前記アクセプタ不純物でドーピングされ、該アクセプタ不純物の濃度 P_{dope} は、前記量子井戸領域における正孔の密度 P' 、前記量子井戸領域の厚さ及び式 $P_{dope} = P' t_{QW} / t_{DER}$ による前記拡散増強領域の厚さに依存する。

【0080】(実施態様8) 垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)であって、ターンオン・ジッタを低減しつつ空間ホールバーニングを低減し、以下の(a)ないし

(c) を含むことを特徴とする垂直共振器型面発光レーザ、

(a) 第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の第一の鏡面層と、

(b) 第一鏡面層に隣接する半導体材料の活性層であって、以下(b-1)および(b-2)を含む活性層、

(b-1) 量子井戸領域と、(b-2) 拡散増強領域であって、前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約1桁上回るような高濃度に半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングした拡散増強領域、

(c) 第二の鏡面層であって、前記活性層に隣接しつつ前記第一鏡面層から離れた層であって、第二の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層である第二の鏡面層。

【0081】(実施態様9) 実施態様8記載のレーザであって、前記拡散増強領域が前記活性層において前記量子井戸領域の外側部に配置されることを特徴とするレーザ。

【0082】(実施態様10) 実施態様8記載のレーザであって、前記拡散増強領域が前記活性層における前記量子井戸領域を包含することを特徴とするレーザ。

【0083】(実施態様11) 実施態様8記載のレーザであって、前記拡散増強領域が前記活性層におけるデルタドープ領域であることを特徴とするレーザ。

【0084】(実施態様12) 実施態様8ないし11に記載のレーザーであって、前記活性層の半導体材料がIII-V族の半導体材料であり、かつ前記アクセプタ不純物がII族の元素とIV族の元素から成る組から選択されることを特徴とするレーザ。

【0085】(実施態様13) 実施態様8に記載のレーザであって、以下の(a)および(b)を含むことを特徴とするレーザ、(a)前記量子井戸領域が全厚 t_{QW} を有する量子井戸、(b)前記拡散増強領域において、前記量子井戸領域における前記拡散増強領域で誘発される正孔の密度 P' が 10^{19} cm^{-3} を越えるようなシート密度 $P_{dope, sheet}$ の前記アクセプタ不純物で前記活性層の半導体材料がドーピングされ、該アクセプタ不純物のシート

密度 $P_{dope, sheet}$ がほぼ $P' t_{QW}$ である。

【0086】(実施態様14)実施態様8記載の製造方法であって、以下の(a)ないし(c)を含むことを特徴とするレーザ、(a)前記量子井戸領域が全厚 t_{QW} を有する量子井戸、(b)厚さ t_{DER} を有する前記拡散増強領域、(c)前記拡散増強領域であって、前記拡散増強領域において前記活性層の半導体材料は前記量子井戸領域における前記拡散増強領域で誘発される正孔の密度 P' が 10^{19} cm^{-3} を超えるような濃度 P_{dope} の前記アクセプタ不純物でドーピングされ、該アクセプタ不純物の濃度 P_{dope} は、前記量子井戸領域における正孔密度 P' 、前記量子井戸領域の厚さ及び式 $P_{dope} = P' t_{QW} / t_{DER}$ による前記拡散増強領域の厚さに依存する。

【0087】本明細書は、本願発明の実証的実施例を詳細に記述するものであるが、本発明は、明確な記述実施例に限定されるものではなく、かつ種々の修正は、前出の請求の範囲に定められた本発明の範囲内で実施し得るものであると解されるべきである。

【図面の簡単な説明】

【図1 A】2つの両極端のビットパターンで変調されたレーザ電流に応答する既知VCSELにおける光子密度の変化を示す図である。

【図1 B】図1Aに示した両極端のビットパターン及びその中間ビットパターンを含むいくつかの異なった疑似ランダムワードパターンで変調されたレーザ電流に応答する既知VCSELにおける光子密度の変化を示す図である。

【図2 A】本発明によるVCSELの好適な実施例の一部分の断面図を示す図である。

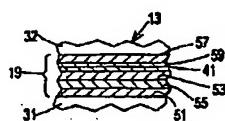
【図2 B】本発明によるVCSELの好適な実施例のドーピング分布を示す図である。

【図2 C】本発明によるVCSELの量子井戸領域の一部分の断面図であって、拡散増強領域の第一の代替配置を示す図である。

【図2 D】本発明によるVCSELの一部分の断面図であって、拡散増強領域の第二の代替配置を示す図である。

【図2 E】本発明によるVCSELの一部分の断面図であって、拡散増強領域の第一の代替構成及び配置を示す図である。

【図2 C】



【図2 D】



【図2 F】本発明によるVCSELの一部分の断面図であって、拡散増強領域の第二の代替構成及び配置を示す図である。

【図3 A】既知VCSELの一部分の断面図であって、VCSEL中のレーザ電流の流れを示す図である。

【図3 B】図3Aに示した既知VCSELの量子井戸領域におけるキャリア密度の変化を示す図である。

【図4】VCSELにおけるキャリア拡散についての発明者のモデルによって予測される、拡散時間定数及び蓄積ゾーンに入るレーザ電流の割合に対するジッタの広がりの依存性を示す図である。

【図5 A】本発明によるVCSELの好適な実施例の一部分の断面図であって、VCSEL中のレーザ電流の流れを示す図である。

【図5 B】図5Aに示した本発明によるVCSELの好適な実施例の量子井戸領域におけるキャリア密度の変化を示す図である。

【符号の説明】

1 1 : 本発明の実施例(VCSEL)

1 3、2 1 3 : 活性層

1 5 : 下部鏡面層

1 7 : 上部鏡面層

1 9、2 1 9 : 量子井戸領域

2 1 : 鏡面要素対

2 3、2 5 : 鏡面要素

2 7 : 陽子注入ゾーン

2 9 : コアゾーン

3 1、2 3 1 : 下部クラッド領域

3 2、2 3 2 : 上部クラッド領域

3 3 : 陽子注入ゾーンの最深部と活性層間の領域

3 5 : 蓄積ゾーン

3 7 : 誘導放出ゾーン

4 1 : 拡散増強領域

4 3 : レーザ電流の流れ

5 1、5 3、5 7 : 量子井戸

5 5、5 9 : 障壁層

2 0 0 : 従来技術によるVCSEL

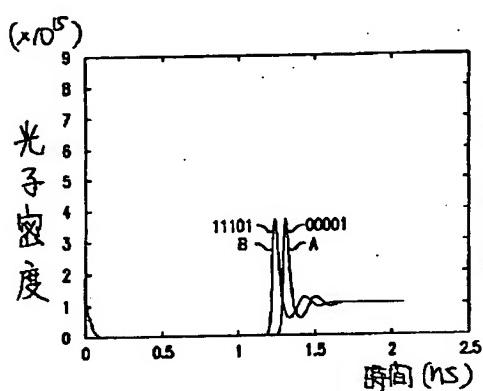
【図2 E】



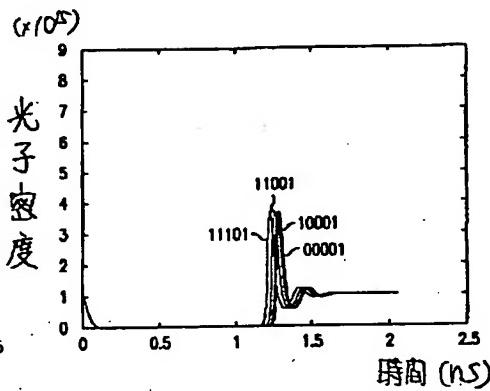
【図2 F】



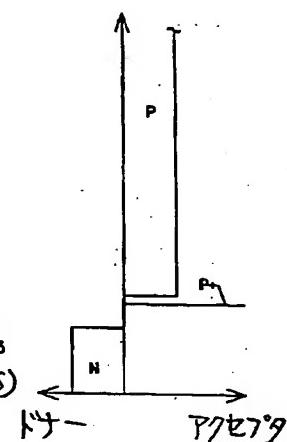
【図1 A】



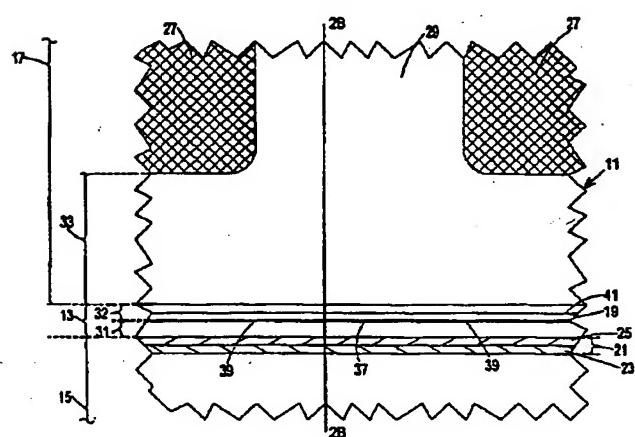
【図1 B】



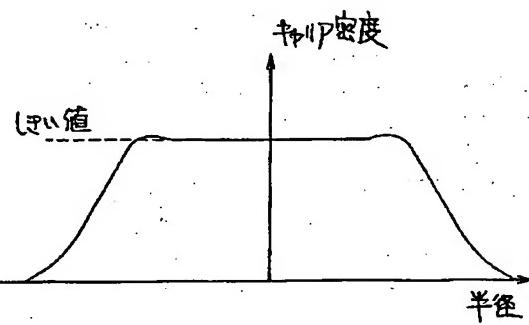
【図2 B】



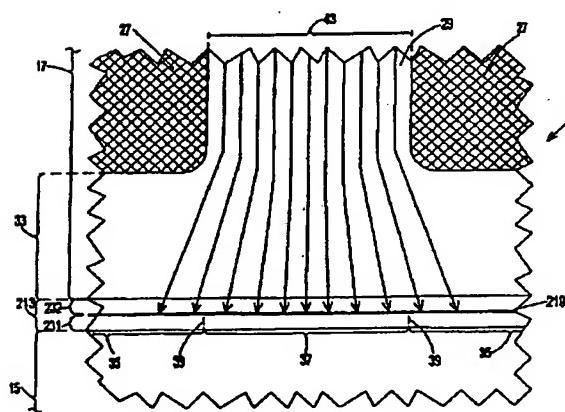
【図2 A】



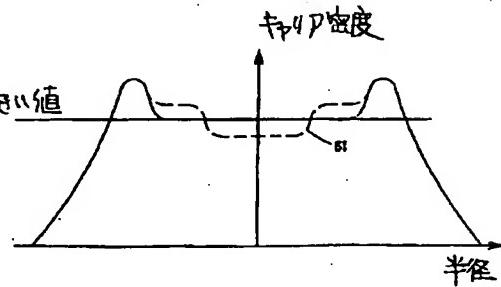
【図5 B】



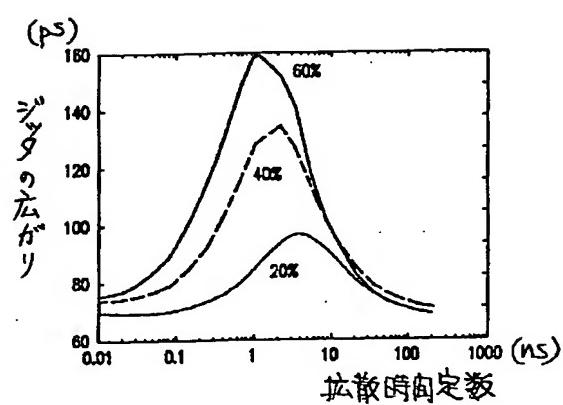
【図3 A】



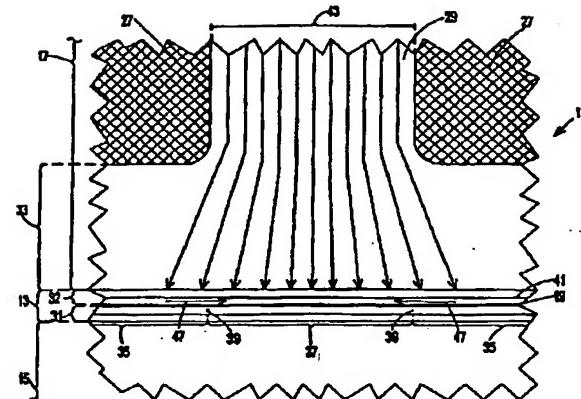
【図3 B】



【図4】



【図5A】



Surfac - mitting las rs

Patent Number: EP0795940, B1
 Publication date: 1997-09-17
 Inventor(s): CORZINE SCOTT W (US); TAN MICHAEL R T (US)
 Applicant(s): HEWLETT PACKARD CO (US)
 Requested Patent: JP9326530
 Application Number: EP19970301538 19970307
 Priority Number(s): US19960614988 19960312
 IPC Classification: H01S3/085; H01S3/19
 EC Classification: H01S5/183
 Equivalents: DE69703261D, DE69703261T, US5867516
 Cited Documents:

Abstract

To produce a surface-emitting laser, doped semiconductor material having a first conductivity mode is deposited to form a first mirror layer (15). A layer of semiconductor material is deposited on the first mirror layer to form an active layer (13), in the course of which a quantum well region (19) is formed, and a diffusion enhancing region (41) is formed by doping the semiconductor material of the active layer with an acceptor impurity to such a high concentration that holes induced in the quantum well region by the diffusion enhancing region predominate over electrons in the quantum well region by about one order of magnitude. Doped semiconductor material having a second conductivity mode is deposited on the active layer to form a second mirror layer (17). The laser comprises a first mirror layer (15), an active layer (13) including a quantum well region (19) and a diffusion enhancing region (41), and a second mirror layer (17).

(17) 

Data supplied from the esp@cenet database - I2

Description

The invention relates to semiconductor lasers and, in particular, to vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers with reduced turn-on jitter and increased single-mode output.

Vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) have many advantages over traditional edge-emitting lasers, such as low cost manufacturing, high yield, good beam quality, and scalable geometries. These properties make VCSELs desirable for many applications. For example, K.H. Hahn, M.R.T. Tan, and S.Y. Wang describe using VCSELs in multimode fiber data links in Modal and Intensity Noise of Large-Area Multiple-Transverse-Mode VCSELs in Multimode-Optical-Fiber Links, 1994 CONFERENCE ON OPTICAL FIBER COMMUNICATION - paper ThB3, OFC '94. However, the turn-on jitter (variation in turn-on delay time) of VCSELs can limit the maximum bit rate that can be achieved in such data links. This problem is described by C.R. Mirasso, P. Colet, and M. San Miguel in Dependence of Timing Jitter on Bias Level for Single-mode Semiconductor Lasers under High Speed Operation, QE-29 IEEE J. QUANTUM ELECTRON., pp. 23-32, (1993), by A. Sapia, P. Spano, C.R. Mirasso, P. Colet, and M. San Miguel in Pattern Effects in Timing Jitter of Semiconductor Lasers, 61 APPL. PHYS. LETT., pp. 1748-1750 (1992), and by T.M. Shen in Timing Jitter in Semiconductor Lasers under Pseudorandom Word Modulation, 7 J. LIGHTWAVE TECHNOLOGY, pp. 1394-1399, (1989).

It is known that the turn-on delay of a VCSEL varies depending on the off time of the VCSEL, i.e., the time that the laser current was switched off before it switched on again. Since the off time of the VCSEL varies according to length of the run of 0s in the data modulating the laser current, the turn-on delay of the VCSEL is subject to a data-dependent jitter. Figures 1A and 1B illustrate the bit pattern-dependence of the turn-on delay time of a single-mode VCSEL. Figure 1 A shows the time dependence

of the photon density during the turn-on process with two extreme bit patterns. Figure 1B shows the time dependence of the photon density during the turn-on process with the two extreme bit patterns and with some intermediate bit patterns. In Figures 1A and 1B, the bit duration is 1 ns, and the laser current is switched between an OFF state of about one-half of the threshold current of the VCSEL and an ON state of about five times the threshold current. In Figure 1A, the turn-on delay time illustrated by curve A, in which a long string of 0s precedes switching to 1 is considerably longer than the turn-on delay time illustrated by curve B, in which a long string of 1s is followed by a single 0 bit before switching back to 1. Comparing curve A with curve B shows that the turn-on delay time varies depending on the bit pattern of the laser current.

Figure 1B shows the variation of the photon density in response to several different pseudo-random word patterns that include the extreme bit patterns shown in Figure 1A with some intermediate bit patterns. Each trace represents a run of a different number of 0s between consecutive 1s. The difference between the maximum and minimum turn-on delay is called the jitter spread. The jitter spread imposes a limitation on the maximum rate at which the VCSEL can be modulated.

In addition to being subject to jitter spread, VCSELs are also subject to spatial hole burning. In VCSELs, light is generated by the laser current flowing through a large cross-sectional area of semiconductor material in the quantum well region. In some applications, a VCSEL is required to emit a light beam having a single Gaussian intensity distribution. This is known as single mode operation, and the light beam generated by the laser in single mode operation will be called a single light beam. VCSELs emit a single light beam when the laser current is just above the threshold level. However, when the laser current is increased beyond a second, higher, threshold level, the laser begins to emit a light beam with a double, or higher, Gaussian intensity distribution.

The VCSEL generates the single light beam in a central stimulated emission zone of the quantum well region. Since light generation depletes the density of carriers depending on the intensity of the light generated, generation of the single light beam results in a depletion zone forming in the center of the stimulated emission zone, and a corresponding increase in the carrier density in a zone surrounding the depletion zone. Spatial hole burning occurs when the carrier density in the depletion zone falls below the threshold, so that light is no longer generated in the depletion zone. The light beam generated by the VCSEL then assumes a double Gaussian intensity profile. At higher laser currents, additional depletion zones may form in the stimulated emission zone, resulting in the light beam generated by the VCSEL having a multiple Gaussian intensity profile. Such an intensity profile makes the VCSEL unsuitable for use in applications in which a light beam having a single Gaussian intensity distribution is required.

The limiting effect of spatial hole burning on the maximum intensity at which VCSELs can generate a single light beam makes VCSELs unsuitable for certain applications. For example, a laser suitable for writing on a magneto-optical disc is required to generate a single light beam with a power of about 30 mW, whereas the highest single light beam power that can be generated by known VCSELs is in the range of 1-2 mW.

Accordingly, to increase the bit transmission rate of VCSEL-based optical communication systems, and to increase the speed at which the light output of the VCSEL of a laser printer can be modulated, and for other applications in which the light output of the VCSEL must be modulated at high speed, a VCSEL having reduced jitter spread is required. Also, to enable VCSELs to be used in applications in which a single light beam having a high intensity is required, a VCSEL is needed in which the onset of spatial hole burning occurs, if at all, at a substantially-increased light intensity compared with known VCSELs.

To meet the objectives just described, the invention provides a method of making a vertical cavity surface-emitting laser (VCSEL) having reduced turn-on jitter and reduced spatial hole burning. In the method, a layer of doped semiconductor material having a first conductivity mode is deposited to form a first mirror layer. A layer of semiconductor material is deposited on the first mirror layer to form an active layer. In depositing the layer of semiconductor material to form the active layer, a quantum well region is formed. Also, a diffusion enhancing region is formed by doping the semiconductor material of the active layer with an acceptor impurity to such a high concentration that holes induced in the quantum well region by the diffusion enhancing region predominate over electrons in the quantum well region by about one order of magnitude. Finally, a layer of doped semiconductor material having a second conductivity mode is deposited on the active layer to form a second mirror layer.

The diffusion enhancing region increases the diffusion rate of carriers in the quantum well region by a factor of between five and 25. This enables carriers to diffuse rapidly within the quantum well region. The diffusion enhancing region enables carriers that would otherwise accumulate in an annular region

surrounding the stimulated emission zone of the quantum well region to diffuse rapidly into the stimulated emission zone when the laser current is switched off. This reduces dependence of the turn on time of the laser on the off time of the laser, and hence reduces jitter spread. The diffusion enhancing region also enables carriers to diffuse from zones of higher carrier density in the quantum well region into the depletion zones caused by the generation of light by stimulated emission, which reduces the likelihood of spatial hole burning occurring.

In forming the diffusion enhancing region, the semiconductor material of the active layer may be doped with the acceptor impurity only while depositing a region of the active layer outside the quantum well region. Alternatively, the semiconductor material of the active layer may be doped with the acceptor impurity while depositing a region of the active layer encompassing the quantum well region. Preferably, however, the diffusion enhancing region is a delta-doped region in the active layer.

In forming the diffusion enhancing region, the diffusion enhancing region is formed by doping the semiconductor material of the active layer with the acceptor impurity at a sheet density P_{dope} , sheet such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm. The sheet density P_{dope} , sheet of the acceptor impurity in the diffusion enhancing region is approximately $P' \times t_{QW}$, where t_{QW} is the total thickness of the quantum wells in the quantum well region. Alternatively, the diffusion enhancing region may be formed with a thickness t_{DER} , and doped with the acceptor impurity to a concentration P_{dope} such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm. The concentration of the acceptor impurity P_{dope} in the diffusion enhancing region depends on the density of holes P' in the quantum well region, the thickness t_{QW} of the quantum well region and the thickness of the diffusion enhancing region according to the expression $P_{dope} = P' \times t_{QW}/t_{DER}$.

The invention also provides a vertical cavity surface-emitting laser (VCSEL) having a reduced turn-on jitter and reduced spatial hole burning. The laser comprises a first mirror layer, an active layer including a quantum well region and a diffusion enhancing region, and a second mirror layer. The first mirror layer is a layer of doped semiconductor material having a first conductivity mode. The active layer is a layer of semiconductor material adjacent the first mirror layer. The second mirror layer is adjacent the active layer and remote from the first mirror layer, and is a layer of doped semiconductor material having a second conductivity mode. The diffusion enhancing region is a region of the active layer in which the semiconductor material of the active layer is doped with an acceptor impurity to such a high concentration that holes induced in the quantum well region by the diffusion enhancing region predominate over electrons in the quantum well region by about one order of magnitude.

The diffusion enhancing region may be located outside the quantum well region in the active layer. Alternatively, the diffusion enhancing region may encompass the quantum well region in the active layer. However, the diffusion enhancing region is preferably a delta-doped region in the active layer.

The semiconductor material in the diffusion enhancing region may be doped with the acceptor impurity at a sheet density P_{dope} , sheet such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm. The sheet density P_{dope} , Sheet of the acceptor impurity is approximately $P' \times t_{QW}$, where t_{QW} is the total thickness of the quantum wells in the quantum well region.

Alternatively, the semiconductor material in the diffusion enhancing region may be doped with the acceptor impurity at a concentration P_{dope} such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm. The concentration of the acceptor impurity P_{dope} depends on the density of holes P' in the quantum well region, the thickness t_{QW} of the quantum well region and the thickness t_{DER} of the diffusion enhancing region according to the expression $P_{dope} = P' \times t_{QW}/t_{DER}$.

Figure 1A is a graph showing the variation of the photon density in a known VCSEL in response to the laser current modulated by two extreme bit patterns.

Figure 1B is a graph showing the variation of the photon density in a known VCSEL in response to the laser current modulated by several different pseudo-random word patterns that include the extreme bit patterns shown in Figure 1A and some intermediate bit patterns.

Figure 2A is a cross sectional view of part of the preferred embodiment of a VCSEL according to the invention.

Figure 2B shows the doping profile of the preferred embodiment of a VCSEL according to the invention.

Figure 2C is a cross-sectional view of part of the quantum well region of a VCSEL according to the invention showing a first alternative location of the diffusion enhancing region.

Figure 2D is a cross-sectional view of part of a VCSEL according to the invention showing a second alternative location of the diffusion enhancing region.

Figure 2E is a cross-sectional view of part of a VCSEL according to the invention showing a first alternative configuration and location of the diffusion enhancing region.

Figure 2F is a cross-sectional view of part of a VCSEL according to the invention showing a second alternative configuration and location of the diffusion enhancing region.

Figure 3A is a cross sectional view of part of a known VCSEL showing the flow of laser current through the VCSEL.

Figure 3B is a graph showing the variation of the carrier density in the quantum well region of the known VCSEL shown in Figure 3A.

Figure 4 is a graph showing the dependence of jitter spread on the diffusion time constant and the fraction of the laser current that enters the reservoir zone, as predicted by the inventors' model of carrier diffusion in a VCSEL.

Figure 5A is a cross sectional view of part of the preferred embodiment of the VCSEL according to the invention showing the flow of laser current through the VCSEL.

Figure 5B is a graph showing the variation of the carrier density in the quantum well region of the preferred embodiment of the VCSEL according to the invention shown in Figure 5A.

The invention provides a VCSEL having a reduced jitter spread and in which the onset of spatial hole burning occurs at an increased light intensity compared with known VCSELs. In the VCSEL according to the invention, the active layer is formed to include a diffusion enhancing region. The diffusion enhancing region is a layer of semiconductor material that is heavily doped with an acceptor impurity. The diffusion enhancing region is located in the active layer adjacent the quantum well region, or inside the quantum well region, or encompassing the quantum well region. The diffusion enhancing region induces a very high density of holes in the quantum well region. The high density of holes in the quantum well region significantly increases the ambipolar diffusion rate of carriers in the quantum well region. Increasing the ambipolar diffusion rate of the carriers in the quantum well region enables carriers to diffuse rapidly in the quantum well region, which significantly reduces the jitter spread of the VCSEL, and increases the maximum light intensity that can be generated before the onset of spatial hole burning.

The preferred embodiment 11 of a VCSEL according to the invention is shown in Figure 2A. Figure 2A is a cross sectional view of the part of the VCSEL that includes the stimulated emission zone 37 of the active layer 13, and part of the core zone 29. The active layer is epitaxially grown on the lower mirror layer 15. The upper mirror layer 17 is epitaxially grown on the active layer. Only the upper part of the lower mirror layer adjacent the active layer and the lower part of the upper mirror layer adjacent the active layer are shown to simplify the drawing. The lower mirror layer and the upper mirror layer are doped to have opposite conductivity modes. For example, the lower mirror layer is preferably doped with a donor impurity (n-type), and the upper mirror layer is preferably doped with an acceptor impurity (p-type).

The upper mirror layer 17 includes the proton implanted zone 27, which defines and surrounds the core zone 29. The proton implanted zone confines the laser current flowing through the upper mirror layer to the core zone. The laser current flows from an electrode formed on the upper surface of the upper mirror layer to an electrode formed on the bottom surface of the substrate on which the lower mirror layer 15 is deposited. The electrodes, the substrate, and the upper surface of the upper mirror layer are not shown in Figure 2A so that the structure of the VCSEL 11 near the active layer can be shown with greater clarity.

The active layer 13 has a thickness of a multiple of lambda n, where lambda n is the wavelength in the material of the active layer of the light generated in the quantum well region 19. The preferred thickness of the active layer is lambda n. The active layer is sandwiched between the lower mirror layer 15 and the upper mirror layer 17. The active layer includes the lower cladding region 31, the upper cladding region 32 and the quantum well region 19. The thickness of the cladding regions is such that the

quantum well region is located half way between the lower mirror layer and the upper mirror layer. Structural details of the quantum well region are omitted from Figure 2A to simplify the drawing, but are shown in Figure 2C and will be described in more detail below.

Light is generated by stimulated emission in the stimulated emission zone 37 of the quantum well region 19. The lateral extent of the stimulated emission zone is defined by the lateral extent of the core zone 29 of the upper mirror layer 17, and is indicated by the lines 39.

The active layer 13 of the first embodiment 11 of the VCSEL according to the invention is formed to include the diffusion enhancing region 41. In the preferred embodiment, the diffusion enhancing region is a delta-doped region located in the active layer outside the quantum well region 19. The diffusion enhancing region is preferably located within a few hundred ANGSTROM ngstroms of the quantum well region in the upper cladding region 32 between the upper mirror layer 17 and the quantum well region.

The diffusion enhancing region 41 is doped with a high concentration of an acceptor impurity. The actual doping level of the diffusion enhancing region depends on the hole density to be induced in the quantum well region and the thickness ratio between the quantum well region and the diffusion enhancing region. When the active layer is a layer of a group III-V semiconductor, the preferred doping material for the diffusion enhancing region is carbon. Other elements that act as acceptor impurities in a group III-V semiconductor can also be used. In particular, group II elements such as magnesium, beryllium or zinc may be used to dope the diffusion enhancing region.

As noted above, in the preferred embodiment, the diffusion enhancing region 41 is a delta-doped region located in the upper cladding region 32 of the active layer 13 within a few hundred ANGSTROM ngstroms of the quantum well region 19. Such a delta-doped region is formed by introducing a sufficient quantity of an acceptor impurity into a single atomic layer of the upper cladding region to provide a sheet doping density that is sufficiently high to induce the required hole density in the quantum well region. Suitable sheet doping densities are of the order of 10 cm⁻², which corresponds to the impurity atoms being introduced in such a concentration that they constitute between about 0.1% and about 1% of the atoms in the single atomic layer. The way in which the required sheet density is determined is described in detail below.

The acceptors in the diffusion enhancing region 41 induce corresponding holes in the quantum well region 19. The doping level of acceptors in the diffusion enhancing region is so high that the density of holes that are induced in the quantum well region is about one order of magnitude greater than the density of electrons therein. Such a high density of holes decouples the diffusion of electrons in the quantum well region from the diffusion of holes. The ambipolar diffusion rate, which measures the effective diffusion rate of both electrons and holes, is increased from a value similar to the hole diffusion rate to a value approaching the electron diffusion rate. The electron diffusion rate is between ten and fifty times the hole diffusion rate in typical semiconductor materials.

Increasing the ambipolar diffusion rate of the carriers in the quantum well region has two beneficial effects. First, jitter spread is reduced. The increased ambipolar diffusion rate reduces the ability of carriers to accumulate in a zone of the active layer surrounding the stimulated emission zone 37. Carriers that would otherwise accumulate in such a zone are able to diffuse laterally into the stimulated emission zone. Second, the single light beam intensity that can be generated before the onset of spatial hole burning is increased because the increased ambipolar diffusion rate enables carriers to diffuse laterally to replenish the supply of carriers in the depletion zone in the center of the stimulated emission zone 37. This prevents the carrier density in the depletion zone from falling below the threshold level, and maintains light generation throughout the stimulated emission zone.

The preferred embodiment 11 of the VCSEL according to the invention will now be described in greater detail. The lower mirror layer 15 and the upper mirror layer 17 are each preferably distributed Bragg reflectors composed of multiple pairs of mirror elements. For example, the lower mirror layer may be composed of 32.5 pairs of mirror elements and the upper mirror layer may be composed of 20 pairs of mirror elements. To simplify the drawing, only the pair of mirror elements 21 in the lower mirror layer immediately adjacent the active layer 13 is shown. Each pair of mirror elements is composed of a high refractive index mirror element and a low refractive index mirror element. The pair of mirror elements 21 is composed of the mirror elements 23 and 25, for example. In each pair of mirror elements, the two mirror elements are layers of different semiconductor materials having different refractive indices. For example, the high refractive index mirror element can be a layer of AlGaAs and the low refractive index mirror element can be a layer of AlAs. Alternatively, layers of AlAs and GaAs, or layers of other pairs of suitable materials known in the art could be used. The mirror elements are preferably constructed to reduce electrical resistance and band offset across the interfaces between adjacent mirror elements, as is known in the art. For example, a graded transition can be made between the materials of the

adjacent mirror elements, or a graded short period super lattice can be formed between adjacent mirror elements. Each mirror element has a thickness of $\lambda n/4$, where λ is the wavelength in the semiconductor material of the mirror element of the light generated in the quantum well region 19.

The proton implanted zone 27 extends into the upper mirror layer 17 from the surface (not shown) of the upper mirror layer remote from the active layer 13, but does not extend into the upper mirror layer as far as the active layer. The electrical conductivity of the proton implanted zone is less than that of the core zone 29 that it surrounds. This conductivity difference confines the laser current flowing through the upper mirror layer to the core zone. In the region 33 between the depth limit of the proton implanted zone and the active layer, the laser current spreads laterally from the confinement imposed by the proton implanted zone. Hence, the laser current flowing into the quantum well region 19 of the active layer is not confined to the stimulated emission zone 37 of the quantum well region, i.e., to the part of the quantum well region that underlies the core zone of the upper mirror layer.

The active layer 13 is a layer of a semiconductor material that is transparent to the light generated in the quantum well region 19. For example, the active layer may be a layer of AlGaAs. Outside the diffusion enhancing region 41, the active layer is either undoped, or is doped with equal concentrations of donor and acceptor impurities. Alternatively, the lower cladding layer 31 of the active layer may be doped with a donor impurity at approximately the same concentration as the donor impurity in the lower mirror layer 15, and the upper cladding layer 32 may be doped with an acceptor impurity at approximately the same concentration as the acceptor impurity in the upper mirror layer 17.

The quantum well region 19 is preferably composed of between three and five quantum wells. Figure 2C shows an example of a quantum well region having three quantum wells. The quantum well 51 is located adjacent the lower cladding region 31, and is separated from the quantum well 53 by the barrier layer 55. The quantum well 57 is located adjacent the upper cladding region 32 and is separated from the quantum well 53 by the barrier layer 59. Each quantum well is preferably a layer of gallium arsenide (GaAs) and each barrier layer is preferably a layer of AlGaAs. Each quantum well preferably has thickness of about 80 ANGSTROM .

The preferred embodiment 11 of the VCSEL according to the invention is made by growing the lower mirror layer 15 on a suitable substrate (not shown) by such techniques as molecular beam epitaxy (MBE) or metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). These techniques of growing thin, ordered layers of semiconductor materials are known in the art. While growing the lower mirror layer 15, donor (n-type) impurities are mixed with the stream of semiconductor materials that are alternately deposited to form the lower mirror layer. Thus, the lower mirror layer is doped n-type.

A layer of AlGaAs, for example, is then deposited on the lower mirror layer 15 by MBE or MOCVD to form the lower cladding region 31 of the active layer 13 adjacent the lower mirror layer. No impurities are mixed with the material deposited to form the lower cladding region. Alternatively, equal concentrations of donor and acceptor impurities may be mixed with the material deposited to form the lower cladding region. As a further alternative, the lower cladding region may be doped with an n-type impurity at a concentration similar to that used in the lower mirror layer, with the concentration being reduced as the thickness of the lower cladding region increases.

After the lower cladding region 31 has reached its required thickness, multiple alternating thin layers of semiconductor materials are deposited on the lower cladding region to form the quantum well region 19. After the quantum well region has been formed, more semiconductor material is deposited on the quantum well region to form the upper cladding region 32. No impurities are mixed with the material deposited to form the upper cladding region. Alternatively, equal concentrations of donor and acceptor impurities may be mixed with the material deposited to form the upper cladding region. As a further alternative, the upper cladding region may be doped with a p-type impurity at a concentration that progressively increases to a concentration similar to that which will be used in the upper mirror layer 17.

The diffusion enhancing region 41 is formed by interrupting the flow of semiconductor material deposited to form the upper cladding region 32 when the thickness of the upper cladding layer is less than a few hundred ANGSTROM ngstroms, and by depositing acceptor impurity atoms on the surface of the partially-formed upper cladding region. Carbon atoms may be deposited as the acceptor impurity by evaporating carbon tetrabromide CBr₄ and bringing the vapor into contact with the partially-formed upper cladding region. Upon contact with the partially-formed upper cladding region, the carbon tetrabromide dissociates, and the resulting carbon atoms are deposited on the lattice of the semiconductor material of the partially-formed upper cladding region as the acceptor impurity. After the acceptor impurity atoms constituting the diffusion enhancing region have been deposited on the partially-formed upper cladding region, deposition of the semiconductor material forming the upper

cladding region is resumed.

When the upper cladding region 32 is of such a thickness that the active layer 13 has the required total thickness of lambda n, the process of depositing materials to form the upper mirror layer 17 is begun. While depositing materials to form the upper mirror layer, acceptor impurities are mixed with the stream of the semiconductor materials alternately deposited to form the upper mirror layer. This dopes the semiconductor materials of the upper mirror layer p-type. The concentration of acceptor impurities introduced into the semiconductor materials deposited to form the upper mirror layer is substantially less than that in the diffusion enhancing region 41.

Figure 2B shows the doping profile of the preferred embodiment 11 of the VCSEL according to the invention along the line 2B-2B in Figure 2A. The y-axis scale in Figure 2B corresponds to the vertical scale of Figure 2A. Figure 2B shows that the lower mirror layer 15 is doped with a moderate to high concentration of a donor impurity. At the boundary between the lower mirror layer and the active layer 13, the concentration of the acceptor impurity sharply decreases to match the concentration of donor impurity. The concentration of donor impurity remains substantially equal to the concentration of acceptor impurity throughout the active layer except in the diffusion enhancing region 41. In the diffusion enhancing region 41, the concentration of acceptor impurities sharply increases to a level about one order of magnitude higher than the concentrations of the donor impurity in the lower mirror layer and the acceptor impurity in the upper mirror layer 17. At the boundary between the active layer and the upper mirror layer, the concentration of acceptor impurity increases sharply to a level that approximately matches that of the donor impurity in the lower mirror layer. The acceptor impurity concentration remains at this level throughout the upper mirror layer.

As noted above, the diffusion enhancing region 41 may be a delta-doped region located anywhere in the active layer 13. However, the diffusion enhancing region is most effective when it is located in the active layer within hundred ANGSTROM ngstroms of the quantum well region 19. In the preferred embodiment shown in Figure 2A, the diffusion enhancing region is a delta-doped region located in the upper cladding region 32 of the active layer 13 within a few hundred ANGSTROM ngstroms of the quantum well region 19.

Figures 2C-2F show alternative locations and configurations of the diffusion enhancing region 41. The diffusion enhancing region may be a delta-doped region located in one of the barrier layers of the quantum well region 19. Figure 2C shows part of the active layer 13 that includes the quantum well region 19. In the quantum well region, the quantum well 51 is located adjacent the lower cladding region 31, and is separated from the quantum well 53 by the barrier layer 55. The quantum well 57 is located adjacent the upper cladding region 32 and is separated from the quantum well 53 by the barrier layer 59. In the alternative shown in Figure 2C, the diffusion enhancing region 41 is a delta-doped region located in the quantum well 19 region outside the quantum wells 51, 53, and 59. The diffusion enhancing region is shown located in the barrier layer 59, but it could alternatively be located in the barrier layer 55.

In the preferred embodiment, the diffusion enhancing region 41 is a delta-doped region located in the active layer 13 between the quantum well region and the upper mirror layer 17. However, the diffusion enhancing region may be a delta-doped region located in the lower cladding layer 31 of the active layer 13 between the quantum well region and the lower mirror layer, as shown in Figure 2D. Again, the diffusion enhancing region is most effective if it is located within a few hundred ANGSTROM ngstroms of the quantum well region.

Thicker layers than the delta-doped regions described above can alternatively be used as the diffusion enhancing region 41. Figure 2E shows part of the active layer 13 in which the upper cladding region 32, the active region 19 and part of the lower cladding region 31 are heavily doped with an acceptor impurity to form the diffusion enhancing region. The diffusion enhancing region is shown as extending part-way through the lower cladding region through the whole of the upper cladding region, encompassing the quantum well region. Alternatively, the diffusion enhancing region may extend from part-way through the lower cladding region to part-way through the upper cladding region, encompassing the quantum well region. As will be described in greater detail below, the sheet density of the acceptor impurity in the bulk-doped diffusion enhancing region shown in Figure 2E can be substantially lower than that in the delta-doped diffusion enhancing regions shown in Figures 2A-2C.

Figure 2F shows a variation in which only part of the upper cladding region 32 is heavily doped with an acceptor impurity to form the diffusion enhancing region 41. A high concentration of an acceptor impurity is added to the material deposited to form the upper cladding region starting when the upper cladding region is less than a few hundred ANGSTROM ngstroms thick. The diffusion enhancing region can extend as far as the upper mirror layer 17, as shown, or can extend part-way to the upper mirror

layer. As will be discussed in detail below, the reduced thickness of the diffusion enhancing region in Figure 2F compared with that of the diffusion enhancing region in Figure 2E requires that the impurity density in the former be greater than that in the latter to induce the same hole density in the quantum well region 19.

The inventors' analysis of the operation of a conventional VCSEL showing the mechanism by which turn-on jitter and spatial hole burning occurs will next be described with reference to Figure 3A. Figure 3A shows a similar part of a conventional VCSEL 200 to the part of the preferred embodiment of the VCSEL according to the invention shown in Figure 2A. The conventional VCSEL shown in Figure 3A has a similar structure to the embodiment shown in Figure 2A, except that it lacks a diffusion enhancing region in its active layer 213. Structural elements of the VCSEL shown in Figure 3A corresponding to those of the preferred embodiment are indicated using the same reference numerals as in Figure 2A, and will not be described in detail here. The representative pair of mirror elements 21 shown in Figure 2A is omitted from Figure 3A to simplify the drawing.

The laser current, indicated by the arrows 43, flows from an electrode formed on the upper surface of the upper mirror layer 17 to an electrode formed on the bottom surface of the substrate on which the lower mirror layer 15 is deposited. The electrodes, the substrate, and the upper surface of the upper mirror layer are not shown in Figure 3A to simplify the drawing. The electrical conductivity difference between the core zone 29 and the surrounding proton implanted zone 27 of the upper mirror layer laterally confines the flow of laser current through the upper mirror layer to the core zone.

The proton implanted zone 27 also defines the lateral extent of the laser current flow 43 through the quantum well region 219 of the active layer 213, although with much less precision than in the upper mirror layer 17. Due to disruption of the crystalline structure caused by proton implantation, the proton implanted region is located in the upper mirror layer so that it does not extend as far as the active layer. The carriers spread laterally beyond the confinement imposed by the proton implanted zone in the region 33 between the depth limit of the proton implanted zone and the active layer.

Carriers entering the quantum well region 219 of the active layer generate light by stimulated emission. However, light generation by stimulated emission only takes place in the stimulated emission zone 37, which is the part of the quantum well region 219 that underlies the core zone 29 of the upper mirror region 17. The lateral spreading of the laser current means that some of the carriers enter the reservoir zone 35 which surrounds the stimulated emission zone and underlies the proton implanted zone 27 of the upper mirror region. Carriers that enter the reservoir zone do not generate light by stimulated emission because the reduced reflectivity of the proton implanted zone results in insufficient optical gain for stimulated emission to occur. The carriers that enter the reservoir zone are not depleted by generating light by stimulated emission. Moreover, since the conventional VCSEL 200 lacks a diffusion enhancing region in the active layer 213, the diffusion rate of the carriers in the quantum well region is relatively low, and carriers entering the reservoir zone diffuse only slowly into the stimulated emission zone. As a result, when the laser current flows, carriers accumulate in the reservoir zone. The density of the carriers that accumulate in the reservoir zone can exceed the threshold density, as shown in Figure 3B.

The inventors' analysis of the effect of the carriers accumulated in the reservoir zone 35 on the turn-on delay of the conventional VCSEL 200 will now be described. The turn-on process of a single-mode proton-implanted VCSEL may be simulated using a set of single-mode rate equations similar to most standard carrier and photon rate equations. L.A. Coldren and S.W. Corzine describe such equations in chapter 5 of DIODE LASERS AND PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS, Wiley Interscience, New York (1995). However, the inventors have amended the equations to include two carrier components to take account of the effect of the carriers in the reservoir zone 35 surrounding the stimulated emission zone 37. The first component represents the carriers in the stimulated emission zone that generate light by stimulated emission when their density approaches the threshold density. The first component is described by the standard rate equations. The second component represents the carriers in the reservoir zone surrounding the stimulated emission zone. As noted above, carriers enter the reservoir zone due to lateral spreading of the laser current resulting from the imperfect lateral confinement of the laser current 43 by the proton-implanted region 27. Carriers entering the reservoir zone are unable to take part in stimulated photon emission, and, due to their low diffusion rate, diffuse out of the reservoir zone only slowly. Therefore they accumulate in the reservoir zone. The rate equations are as follows:

$$dN_1 \text{ DIVIDED } dt = 1 - \alpha \eta I \text{ DIVIDED } qV_1 - (R_{sp1} + R_{nr1}) - VgN_p - N_1 - N_2 \text{ DIVIDED } T_d$$

$$dN_p \text{ DIVIDED } dt = (\text{GAMMA } V_{gg} - 1 \text{ DIVIDED } T_p)N_p + \text{GAMMA } R_{sp}$$

$$dN_2 \text{ DIVIDED } dt = \alpha \eta I \text{ DIVIDED } qV_2 - (R_{sp2} + R_{nr2}) + V_1 \text{ DIVIDED } V_2 N_1 - N_2 \text{ DIVIDED } T_d$$

where:

N1 and N2 are the carrier densities in the stimulated emission zone and the reservoir zone, respectively;

V1 and V2 are the volumes of the stimulated emission zone and the reservoir zone, respectively; I is the laser current;

alpha is the fraction of the laser current / entering the reservoir zone: alpha is related to V1 and V2 by the expression:

$$V2 = \text{alpha} V1 \text{ DIVIDED } 1 - \text{alpha}$$

Np is the average photon density;

Tp is the photon lifetime;

g is the material gain;

vg is the group velocity;

GAMMA is a three-dimensional confinement factor that includes standing wave enhancements;

eta is the perpendicular injection efficiency (assumed to be equal in both the stimulated emission zone and the reservoir zone);

Rsp is the spontaneous emission rate;

Rnr is the nonradiative recombination rate including Auger recombination, and is the spontaneous emission rate into the lasing mode; and

Td is the diffusion time.

The coupling term between the stimulated emission zone and the reservoir zone includes the diffusion time, Td. This term characterizes the rate of diffusion of carriers from one zone to the other. The diffusion time can be expressed as:

$$Td = L \text{ DIVIDED } 2Dnp$$

where:

Dnp is the ambipolar diffusion constant representing the diffusion of both electrons and holes; and L is a characteristic diffusion length between the two zones.

An exact calculation of the diffusion time would have to include the spatial dependencies of both carrier and photon densities. However, in the present analysis, a diffusion time calculated as set forth above is sufficiently precise to be used to predict the effects of carrier diffusion between the reservoir zone and the stimulated emission zone. A typical diffusion length of 5 μm and a typical ambipolar diffusion constant of 10 cm s give a typical diffusion time Td in the order of 10 ns.

Figure 4 is derived from the inventors' model described above, and shows the effect of the carrier diffusion time constant on jitter spread. The jitter spread is the variation between the maximum and minimum turn-on times obtained under the conditions of curves A and B of Figure 1A. Jitter spread occurs because carriers from the laser current accumulate in the reservoir zone 35 outside the stimulated emission zone 37. The accumulation of carriers in the reservoir zone acts as a temporary supply of carriers that diffuse into the stimulated emission zone after the laser current is switched off. The carriers diffusing into the stimulated emission zone prevent the carrier density in the stimulated emission zone from rapidly falling to zero. Instead, the diffusing carriers maintain the carrier density in the stimulated emission zone for a short time after the laser current is switched off. As a result, when the laser current is switched off briefly, as in curve B of Figure 1A, the carrier density in the stimulated emission zone is higher than it would be if there were no carrier diffusion. This causes a shorter-than-normal turn-on time because the laser current has to inject fewer carriers into the stimulated emission zone to restore the carrier density to the threshold level.

On the other hand, when the laser current is switched off for a relatively long time, such as when a long string of 0s precedes a 1 as in Figure 1A, sufficient time elapses for the carriers to diffuse from the reservoir zone to the stimulated emission zone, and for the density of the carriers in the stimulated emission zone then to decay to a low value. When the laser current is switched back on, the laser current must inject sufficient carriers into the stimulated emission zone to build the carrier density up from this low level to the threshold level. This requires a longer time than when the carrier density in the stimulated emission zone is maintained by the carriers diffusing from the reservoir zone. Thus, the turn-on delay varies depending on the off time of the laser current. The maximum turn-on time is obtained when the turn-on is preceded by a long off time, e.g., an off time corresponding to the time of five bits. The minimum turn-on time is obtained when the turn-on is preceded by a short off time, e.g., an off time corresponding to the time of one bit.

In Figure 4, each curve shows how the jitter spread varies according to the diffusion time Td between

the reservoir zone and the stimulated emission zone. Three curves are shown. Each curve is for a different percentage of the laser current entering into the reservoir zone. Figure 4 shows that when a greater fraction of the laser current enters the reservoir zone, the jitter spread increases, and that a diffusion time in a certain range in relation to the bit rate increases the jitter spread by a factor of more than two.

Figure 4 also shows that, when the diffusion time T_d is very small or very large, the jitter spread reduces to a value corresponding to there being no diffusion of carriers from a reservoir of carriers. When the diffusion time is very small, carriers diffuse rapidly from the reservoir zone to the stimulated emission zone, and the carrier densities in the two zones rapidly reach equilibrium. Thus, reducing the diffusion time to a very small value can substantially reduce the jitter spread caused by carriers accumulating in the reservoir zone. On the other hand, a very large diffusion time results in carriers diffusing between the two zones so slowly that the reservoir zone cannot supply carriers to the stimulated emission zone quickly enough to maintain the carrier density in the stimulated emission zone after the laser current is turned off. Therefore, when the diffusion time T_d is either very small or very large, diffusion of carriers from the reservoir zone does not cause a significant jitter spread. The largest jitter spread occurs when the diffusion time is comparable with the carrier lifetime.

As stated above, the diffusion time T_d between the reservoir zone and the stimulated emission zone is related to the ambipolar diffusion constant D_{np} and the characteristic diffusion length L between the reservoir zone and the stimulated emission zone by the following equation:

$$T_d = L \text{ DIVIDED } 2D_{np}$$

The ambipolar diffusion constant D_{np} is related to electron density N , the electron diffusion constant D_n , the hole density P , and the hole diffusion constant D_p by the following equation:

$$D_{np} = N + P \text{ DIVIDED } NID_p + PID_n$$

The conventional VCSEL shown in Figure 3A lacks a diffusion enhancing region. Consequently, the electron density in the quantum well region 219 is equal to the hole density, i.e., $P = N$, and the ambipolar diffusion constant is:

$$D_{np} = 2D_n D_p \text{ DIVIDED } D_n + D_p$$

It can be assumed that the electron diffusion constant D_n and the hole diffusion constant D_p are proportional to the electron mobility μ_n and the hole mobility μ_p , respectively, i.e.:

$$D_n \text{ DIVIDED } D_p = \mu_n \text{ DIVIDED } \mu_p$$

For typical quantum well region materials, the electron mobility μ_n is in the range of 10-50 times the hole mobility μ_p . As a result:

$$D_n \gg D_p, \text{ and}$$

$D_{np} \text{ APPROX } 2D_p$ in a conventional VCSEL.

Thus, in the quantum well region 219 of the conventional VCSEL, the ambipolar diffusion constant is about twice that of the hole diffusion constant, and is in the range of one-fifth to 1/25 of the electron diffusion constant.

The action of the diffusion enhancing region in the VCSEL according to the invention in reducing jitter spread and spatial hole burning will now be described with reference to Figure 5A and 5B using the preferred embodiment 11 of the VCSEL according to the invention as an illustrative example. Figure 5A shows the preferred embodiment of the VCSEL according to the invention as an illustrative example. In the VCSEL 11 according to the invention, the diffusion enhancing region 41 reduces jitter spread and prevents spatial hole burning by reducing the diffusion time T_d .

The flow of the laser current through the upper mirror layer 17 of the VCSEL 11 is indicated by the arrows 43. The flow of the laser current is similar to that in the conventional VCSEL shown in Figure 3A. The electrical conductivity difference between the core zone 29 and the surrounding proton implanted zone 27 of the upper mirror layer laterally confines the flow of laser current through the upper mirror layer to the core zone. The proton implanted zone 27 also defines the lateral extent of the laser current flow 43 through the quantum well region 19 of the active layer 13, although with much less precision than in the upper mirror layer 17. Accordingly, a fraction of the laser current enters the quantum well region in the reservoir zone 35 surrounding the stimulated emission zone 37. The carriers entering the reservoir zone are not depleted by taking part in light generation.

The VCSEL according to the invention includes the diffusion enhancing region 41 in the active layer 13. The diffusion enhancing region is heavily doped with an acceptor impurity. The high concentration of acceptor impurities in the diffusion enhancing region induces a high density of holes in the quantum well region. As a result, the density of holes in the quantum well is much greater than the density of electrons, i.e., $P \gg N$. When the density of holes is much greater than the density of electrons, the ambipolar diffusion constant in the quantum well region becomes:

$D_{np} \text{ APPROX } D_n$

Thus, in the VCSEL according to the invention, the much greater density of holes in quantum well region compared with the density of electrons increases the ambipolar diffusion constant D_{np} in the quantum well region to about the same as the electron diffusion constant D_n . In other words, the diffusion enhancing region reduces the diffusion time T_d by a factor in the range of five to 25 compared with a conventional VCSEL. Figure 4 shows that, in VCSELs in which the jitter spread is close to the maximum, a reduction of the diffusion time by a factor in the range of five-25 results in a significant reduction in jitter spread. This, in turn, enables the frequency at which the laser current is modulated to be increased, or enables simpler detection circuits to be used if the modulation frequency is not changed.

The reduced diffusion time T_d caused by the diffusion enhancing region 41 enables carriers to diffuse more rapidly from the reservoir zone 35 in the quantum well region 19 to the stimulated emission zone 37 than in a conventional VCSEL. Since carriers can diffuse from the reservoir zone into the stimulated emission zone, as indicated by the arrows 47 in Figure 5A, the density of carriers that accumulates in the reservoir zone is reduced. The resulting distribution of the carrier density is shown in Figure 5B.

The reduced diffusion time not only reduces the maximum density of carriers that accumulate in the reservoir zone 35 while the laser current is switched on, but also reduces the time required for any carriers remaining in the reservoir zone when the laser current is switched off to diffuse into the stimulated emission zone 37 and to take part in stimulated emission. Consequently, the carrier density in the stimulated emission zone falls to a low value more rapidly after the laser current is switched off than in a conventional VCSEL. Then, when the laser current is switched back on, the laser current must always build the carrier density up from this low level. The dependence of the turn-on time on the off time is therefore reduced.

In addition to reducing the jitter spread, the increased rate of carrier diffusion caused in the quantum well region 19 by the diffusion enhancing region 41 in the VCSEL according to the invention also increases the maximum intensity of the single light beam generated by the VCSEL. As noted above, at low laser currents, stimulated emission occurs throughout the stimulated emission zone 37 with the highest intensity being generated in the center of the zone. Stimulated emission reduces the carrier density in the stimulated emission zone in proportion to the light intensity. As a result, the depletion of the carrier density is greatest in the center of the stimulated emission zone. This depletion of the carrier density in the center of the stimulated emission zone of a conventional VCSEL is indicated by the broken line 61 in Figure 3B. As the laser current is increased, spatial hole burning occurs when the carrier density in the center of the stimulated emission zone falls sufficiently below the threshold that light is no longer generated there.

The diffusion enhancing region 41 in the active layer 13 of the VCSEL 11 according to the invention increases the rate at which carriers diffuse laterally in the active layer. Analogously to the way in which the diffusion enhancing region speeds up the diffusion of carriers between the reservoir zone 35 and the stimulated emission zone 37 described above, the increased rate of carrier diffusion induced in the quantum well region by the diffusion enhancing region enables carriers to diffuse into the center of the stimulated emission zone when the carrier density is depleted by light generation. This prevents the carrier density in the center of the stimulated emission zone from falling so far below the threshold density that light generation no longer occurs. Accordingly, when light generation by stimulated emission depletes the carrier density in the center of the stimulated emission zone, carriers can diffuse radially inwards into the depletion zone, where they take part in generating a single light beam by stimulated emission. Since carriers from a wide area of the active layer take part in generating the single mode light beam, the maximum single mode light output of the VCSEL according to the invention is consequently greater than in a conventional VCSEL lacking a diffusion enhancing region.

Moreover, the inventors predict from their VCSEL model that, in large-area VCSELs, the effect of the diffusion enhancing region 41 on producing a more uniform distribution of carriers in the stimulated emission zone 37 will result in a more uniform distribution of modes, and that such modes will change less sporadically with increasing laser current. The more uniform distribution of modes will result in a smoother light intensity/laser current characteristic, with fewer discontinuities than in the intensity/laser current characteristics of conventional VCSELs.

The inventors also predict from their VCSEL model that the diffusion enhancing region 41 will significantly increase the differential gain of the quantum well region 19. Differential gain is the variation of gain with carrier density. The increased differential gain will increase the relaxation resonance frequency of the VCSEL according to the invention compared with a conventional VCSEL, enabling the VCSEL according to the invention to be operated at higher modulation speeds.

Finally, the process for determining the doping level in the diffusion enhancing region 41 of the VCSEL according to the invention will be described. The electron density and the hole density in the quantum well region of a conventional VCSEL are each about $4 \times 10 \text{ cm}^3$ at the threshold level of the laser current. The product PN of the electron density and the hole density is therefore about $1.6 \times 10 \text{ cm}^3$. In the VCSEL according to the invention, the diffusion enhancing region 41 must be heavily doped with an acceptor impurity so that the hole density P' induced in the quantum well region 19 is about one order of magnitude greater than the electron density N' . This inequality is required for the diffusion enhancing region to produce an effective increase the ambipolar diffusion constant. Also, for the VCSEL according to the invention to have approximately the same gain as a conventional VCSEL, the diffusion enhancing region has to be doped so that the product $P'N'$ of the electron density and the hole density in the quantum well region is similar to the value of PN of the conventional VCSEL. These requirements may be satisfied, for example, by making the hole density P' in the quantum well region about ten times the electron density N' , i.e.:

$$P' = 10N'$$

Also:

$$P'N' = 1.6 \times 10$$

Substituting for N' we get:

$$P' = 1.26 \times 10$$

The corresponding electron density N' in the quantum well region is then:

$$N' = 1.6 \times 10 \text{ DIVIDED } 1.26 \times 10 = 1.26 \times 10 \text{ cm}^{-3}$$

This choice of values for the hole density P' and the electron density N' in the quantum well region 19 sets the hole density P' at 10 times the electron density N' . This order of inequality in the carrier densities is sufficient to increase the ambipolar diffusion constant D_{np} to a value substantially equal to the electron diffusion constant D_n , so that the characteristic diffusion time T_d is reduced by a factor of about half the ratio of the electron diffusion constant and the hole diffusion constant, i.e., by a factor in the range of five-25. It can be seen from Figure 4 that reducing the diffusion time by an amount in this range produces a substantial reduction from the jitter spread.

The diffusion enhancing region 41 induces in the quantum well region 19 a sheet density P_{QW} , sheet of holes substantially equal to the sheet density $P_{dope, sheet}$ of holes in the diffusion enhancing region 41. Thus, the diffusion enhancing region must be doped with an acceptor impurity at a sheet density such that the sheet density of the holes induced in the quantum well region corresponds to the desired bulk density of holes P' . The sheet density in the quantum well region P_{QW} -sheet is equal to the product of the desired bulk density P' of holes in the quantum well region, and the total thickness t_{QW} of the quantum wells in the quantum well region, i.e.,

$$P_{QW, sheet} = P't_{QW}$$

With the value of P' set to 1.26×10 , as described above, and with three 80 ANGSTROM -thick quantum wells in the quantum well region having a total thickness t_{QW} of 240 ANGSTROM , the sheet density P_{QW} , sheet that must be induced in the quantum well region is about:

$$P_{QW, sheet} = 1.26 \times 10 \times 2.4 \times 10 \text{ APPROX } 3 \times 10 \text{ cm}^{-2}$$

Delta-doped regions are characterized by their sheet doping density. Hence, in embodiments having a delta-doped diffusion enhancing region 41, such as those shown in Figures 2A and 2C, the diffusion enhancing region is doped such that its sheet doping density $P_{dope, sheet}$ is equal the sheet density P_{QW} , sheet of the quantum well region, i.e.,

$$P_{dope, sheet} = P_{QW, sheet} \text{ APPROX } 3 \times 10 \text{ cm}^{-2}$$

In embodiments having a bulk doped diffusion enhancing region 41, such as those shown in Figures 2D and 2E, the diffusion enhancing region is also doped such that its sheet doping density $P_{dope, sheet}$ is equal the sheet density P_{QW} , sheet of the quantum well region, i.e., to about $3 \times 10 \text{ cm}^{-2}$; i.e.:

The sheet doping density $P_{dope, sheet}$ of the diffusion enhancing region is equal to the product of the

required bulk doping density Pdope in, and the thickness tDER of, the diffusion enhancing region. Thus the required bulk doping density Pdope of the diffusion enhancing region is given by:

$$Pdope = P' \times tQW \text{ DIVIDED } tDER$$

or

$$Pdope = Pdope, \text{sheet} \text{ DIVIDED } tDER \text{ APPROX } 3 \times 10 \text{ DIVIDED } tDER$$

Thus, the bulk doping density required in the diffusion enhancing region 41 to induce a given hole density in the quantum well region is inversely proportional to the thickness of the diffusion enhancing region.

Although this disclosure describes illustrative embodiments of the invention in detail, it is to be understood that the invention is not limited to the precise embodiments described, and that various modifications may be practiced within the scope of the invention defined by the appended claims.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

Claims

1. A method of making a vertical cavity surface-emitting laser (11) comprising the steps of:

depositing a layer of doped semiconductor material having a first conductivity mode to form a first mirror layer (15);

depositing a layer of semiconductor material on the first mirror layer to form an active layer (13), the step of depositing the layer of semiconductor material including the steps of:

forming a quantum well region (19), and

forming a diffusion enhancing region (41) by doping the semiconductor material with an acceptor impurity to such a high concentration that holes induced in the quantum well region by the diffusion enhancing region predominate over electrons therein by about one order of magnitude; and

depositing a layer of doped semiconductor material having a second conductivity mode on the active layer to form a second mirror layer (17).

2. The method of claim 1, in which, in the step of forming the diffusion enhancing region, the semiconductor material is doped with the acceptor impurity only while depositing a region (32) of the active layer outside the quantum well region, or the semiconductor material is doped with the acceptor impurity while depositing a region of the active layer encompassing the quantum well region, or the diffusion enhancing region is a delta-doped region.

3. The method of claim 1 or 2 in which the semiconductor material deposited as the active region is a group III-V semiconductor material, and the acceptor impurity is selected from a set consisting of group II elements and group IV elements.

4. The method of any one of the preceding claims, in which:

in the step of forming the quantum well region, quantum wells (e.g., 51, 53, 57) having a total thickness tQW are formed; and

in the step of forming the diffusion enhancing region, the diffusion enhancing region is formed by doping the semiconductor material of the active layer with the acceptor impurity at a sheet density Pdope, sheet such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm, the sheet density Pdope, sheet of the acceptor impurity in the diffusion enhancing region being approximately $P' \times tQW$.

5. The method of any one of claims 1 to 3, in which:

in the step of forming the quantum well region, quantum wells (e.g., 51, 53, 57) having a total thickness tQW are formed; and

in the step of forming the diffusion enhancing region, the diffusion enhancing region is formed with a thickness tDER, and the semiconductor material of the active layer is doped with the acceptor impurity to a concentration Pdope such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm, the concentration of the acceptor impurity Pdope depending on the density of holes P' in the quantum well region, the thickness of the quantum well region and the thickness of the diffusion enhancing region according to the expression Pdope = P' x tQW/tDER.

6.A vertical cavity surface-emitting laser comprising:

a first mirror layer (15) of doped semiconductor material having a first conductivity mode; an active layer (13) of semiconductor material adjacent the first mirror layer, the active layer including:

a quantum well region (19), and
a diffusion enhancing region (41) in which the semiconductor material is doped with an acceptor impurity to such a high concentration that holes induced in the quantum well region predominate over electrons therein by about one order of magnitude; and

a second mirror layer (17) adjacent the active layer and remote from the first mirror layer, the second mirror layer being a layer of doped semiconductor material having a second conductivity mode.

7.The laser of claim 6, in which the diffusion enhancing region is located outside the quantum well region in the active layer, or in which the diffusion enhancing region encompasses the quantum well region in the active layer, or in which the diffusion enhancing region is a delta-doped region in the active layer.

8. The laser of claim 6 or 7 in which the semiconductor material of the active region is a group III-V semiconductor material, and the acceptor impurity is chosen from a set consisting of group II elements and group IV elements.

9.The laser of any one of claims 6 to 8, in which:

the quantum well region includes quantum wells (e.g., 51, 53, 57) having a total thickness of tQW; and in the diffusion enhancing region, the semiconductor material of the active layer is doped with the acceptor impurity at a sheet density Pdope, sheet such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm, the sheet density Pdope, sheet of the acceptor impurity being approximately $P' \times tQW$.

10. The laser of any one of claims 6 to 8, in which:

the quantum well region includes quantum wells (e.g., 51, 53, 57) having a total thickness of tQW; the diffusion enhancing region has a thickness tDER; and in the diffusion enhancing region, the semiconductor material of the active layer is doped with the acceptor impurity at a concentration Pdope such that the density of holes P' induced by the diffusion enhancing region in the quantum well region exceeds 10 cm, the concentration of the acceptor impurity Pdope depending on the density of holes P' in the quantum well region, the thickness of the quantum well region and the thickness of the diffusion enhancing region according to the expression $Pdope = P' \times tQW/tDER$.

Data supplied from the esp@cenet database - I2